



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KOMPLEXNÍ NÁVRH ÚSEKU VENKOVNÍHO VEDENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY

COMPLEX DESIGN OF THE OVERHEAD LINE SECTION OF THE TRANSMISSION SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Reiskup

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Filip Reiskup

ID: 171060

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Komplexní návrh úseku venkovního vedení přenosové soustavy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Charakterizovat přenosovou soustavu ČR a v návaznosti na provedení venkovního vedení konkretizovat hlavní technické odlišnosti mezi přenosovou a distribuční soustavou.
2. Popsat základní druhy vodičů používaných pro linky přenosové soustavy a uvést jejich vlastnosti. Specifikovat využívané materiály pro výrobu vodičů a jejich provedení. Utvořit výpis využívaných typů vodičů.
3. Realizovat základních členění stožárů, včetně uvedení jejich vlastností, výhod a oblastí využití. Specifikovat jednotlivé nosné prvky venkovního vedení.
4. Charakterizovat atmosférické podmínky mající vliv na vlastnosti venkovního vedení. Uvést způsoby ochrany proti těmto vlivům. Uvedení věcného postup výpočtu vedení z hlediska jeho mechanických vlastností. Stanovení stavové rovnice. Výpočet vybraných parametrů vedení.
5. Provést výběr a bližší popis lokality určené pro umístění a návrh venkovního vedení 400 kV.
6. Realizovat technický návrh a výpočet dvou kotevních úseků venkovního vedení 400 kV ve vybrané lokalitě. Zhodnotit dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Práce s technickými normami, platnou legislativou a dalšími odbornými materiály určenými vedoucím práce.

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 5.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce

REISKUP, F. *Komplexní návrh úseku venkovního vedení přenosové soustavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 83 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D..

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Komplexní návrh úseku venkovního vedení přenosové soustavy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 31.5.2017

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Ptáčkovi, PhD. za odborné rady, ochotu a vstřícnost při zpracování této práce. Mé poděkování patří také panu Ing. Ivu Pospíchalovi a panu Ing. Josefu Veselému ze společnosti ČEPS Invest, a.s. za spolupráci při realizaci praktické části práce.

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem úseku venkovního vedení přenosové soustavy umístěného v lokalitách se specifickými atmosférickými podmínkami. V práci je detailněji popsána elektrizační síť v České republice a jsou uvedeny rozdíly mezi distribuční a přenosovou soustavou. Teoretická část práce charakterizuje dílčí prvky venkovního vedení a popisuje používané vodiče a stožáry. Dále je proveden rozbor problematiky klimatických podmínek majících vliv na vlastnosti vedení. V práci je rozebrána mechanika vedení a jsou charakterizovány nesymetrické stavy z hlediska mechaniky vedení.

Praktická část práce se zabývá již konkrétním návrhem úseku vedení přenosové soustavy. V rámci praktické části je hodnocena oblast, kde je předpoklad výstavby výkonově významného zdroje elektrické energie. V souvislosti s tím jsou hledány možná řešení vyvedení výkonu do elektrizační soustavy. Z navržených možností je vybrána technicky nejpravděpodobnější varianta, která uvažuje nové venkovní vedení 400 kV. Pro tuto variantu je proveden výpočet dvou kotevních úseků v různých námrazových oblastech. Výsledkem výpočtů jsou projekční tabulky a podélné profily daných úseků. Porovnáním výsledků je ukázáno, jak námraza ovlivňuje zatížení vedení.

Klíčová slova:

venkovní vedení; přenosová soustava; mechanika vodiče;
stožáry; námraza; návrh vedení; 400 kV

Abstract

The aim of thesis is a design of overhead lines of transmission system under specific weather conditions in given area. Furthermore, it gives a summary about the transmission and distribution systems and describes basics of overhead lines, used conductors and pylons in Czech Republic. It also presents the issue of climate conditions having a eminent influence on overhead lines. Moreover, theoretical part of thesis contains conductor mechanics and also mentions asymmetric state of overhead lines.

Practical part deals with a design of specific part of overhead lines at voltage level of 400 kV and generally evaluates area where lines would be operated. In this area the new power energy source is hypothetically planned and therefore thesis analyzes possible variants of connection this source to transmission system. For one of these variants there are the calculations of two sections of the overhead lines under different weather conditions in more detail. The results bring longitudinal profile and assembling table for each section and they demonstrate the major impact of icing on the overhead lines.

Key words:

overhead lines; transmission system; conductor mechanics;
pylon; icing; design of overhead lines; 400 kV

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Seznam symbolů a zkratk	13
1 Úvod	16
2 Elektrizační soustava	17
2.1 Dělení elektrizační soustavy	17
2.2 Vývoj přenosové soustavy	18
2.3 Současný stav přenosové soustavy	18
2.4 Elektrizační soustava - region severní Čechy současný stav	19
2.5 Elektrizační soustava - region severní Čechy výhled do budoucna	20
2.6 Ústí nad Labem - elektrizační soustava	21
3 Elektrické vedení	23
3.1 Vodiče pro vedení VVN	23
3.2 Materiál vodiče	26
3.3 Požadavky na vodiče	26
3.4 Tvary vodičů	27
3.5 Typy vodičů	28
3.5.1 Vysokoteplotní vodiče	29
3.5.2 Speciální typy vodičů	31
4 Stožáry	32
4.1 Druhy stožárů	32
4.2 Části stožárů	33
4.3 Rozdělení stožárů	34
4.4 Konstrukční řešení stožárů	35
4.4.1 Jednodříkové stožáry	35
4.4.2 Dvoudříkové stožáry	36
4.4.3 Kotvené stožáry	36
4.5 Bezpečná vzdálenost vedení od okolí	37
5 Klimatické podmínky ovlivňující vlastnosti vodiče	39
5.1 Povětrnostní vlivy	39

5.2 Teplota	40
5.3 Námraza	40
5.3.1 Výpočet návrhového zatížení námrazou	42
5.3.2 Dílčí koeficienty zatížení při mezních stavech únosnosti	43
5.3.3 Ekvivalentní průřez vodiče s námrazou	44
5.3.4 Odstranění námrazy z vedení	44
5.4 Vítr	45
5.4.1 Kategorie terénu a rychlost větru	46
5.4.2 Zatížení větrem	47
5.5 Kombinované zatížení větrem a námrazou	50
5.6 Vibrace a ochrana proti rozkmitání vodičů	51
6 Mechanika venkovního vedení	53
6.1 Odvození průhybové křivky - souměrná řetězovka	53
6.1.1 Mechanický výpočet vodiče	56
6.2 Průhybová křivka - souměrná parabola	58
6.2.1 Mechanický výpočet vodiče	58
6.3 Nesouměrně zavěšený vodič	60
6.4 Stavová rovnice napnutého vodiče	63
6.4.1 Odvození stavové rovnice	64
6.4.2 Kritické rozpětí	65
6.4.3 Kritická teplota	66
6.5 Nesymetrické stavy na vedení	67
6.5.1 Určení tíhového rozpětí	68
7 Návrh úseku vedení	70
7.1 Výběr lokality	70
7.2 Varianty vyvedení výkonu	71
7.2.1 Vyvedení výkonu směrem na západ	71
7.2.2 Vyvedení výkonu směrem na východ	72
7.2.3 Výsledná varianta	72
7.3 Popis vybraných úseků vedení	73
7.4 Vodiče a stožáry	74
7.5 Návrh dvou kotevních úseků vedení	75

7.5.1 Kotevní úsek mezi stožáry č.1.1 - 1.12	75
7.5.2 Kotevní úsek mezi stožáry č.2.1 - 2.11	75
7.5.3 Srovnání navržených kotevních úseků	76
7.6 Podélné profily úseků	77
7.7 Vychýlení izolátorů	77
8 Závěr	79
9 Použitá literatura	81

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schéma elektrizační soustavy [18]	17
Obr. 2 - Distribuční oblasti ČR [19]	18
Obr. 3 - Schéma přenosové soustavy [20]	19
Obr. 4 - Výhled PS v roce 2040 [21].....	21
Obr. 5 - Elektrizační síť v okolí ÚnL (modifikováno z [22])	22
Obr. 6 - Konstrukce kombinovaného lana [11]	26
Obr. 7 - Tvary vodičů [15] : a) Vodič typu Z b) Segmentovaný vodič	28
Obr. 8 - Vodič typu G(Z)TACSR [16]	30
Obr. 9 - Funkce kotevních stožárů [23]	32
Obr. 10 - Části stožáru [24].....	33
Obr. 11 - Typy stožárů [27]	35
Obr. 12 - Kotvený stožár (typ V)[26]	37
Obr. 13 - Přetížení vodiče větrem [17]	49
Obr. 14 - Řetězovka [11].....	54
Obr. 15 - Mechanický výpočet vodiče [11].....	56
Obr. 16 - Mechanický výpočet vodiče - parabola (modifikováno z [11])	59
Obr. 17 - Nesouměrně zavěšený vodič [29]	60
Obr. 18 - Utopený stožár [17].....	63
Obr. 19 - Kritické rozpětí [17]	66
Obr. 20 - Určení tíhového rozpětí [17]	69
Obr. 21 - Varianty vyvedení výkonu PVE (modifikováno z [22])	71
Obr. 22 - Výskyt námrazy na 1. úseku	73
Obr. 23 - Výskyt námrazy na 2. úseku	74
Obr. 24 - Vychýlení izolátoru	78

Seznam tabulek

Tab. 1 - Metody „upratingu”[33].....	24
Tab. 2 - Elektrická vzdálenost [17]	37
Tab. 3 - Extrémní referenční zatížení námrazou [28].....	41
Tab. 4 - Extrémní referenční zatížení námrazou [11].....	43
Tab. 5 - Větrné oblasti [28].....	46
Tab. 6 - Kategorie terénu [11]	47
Tab. 7 - Dynamický koeficient rozpětí [11]	48
Tab. 8- Koeficient aerodynamického odporu vodičů [11].....	48
Tab. 9 - Srovnání navržených kotevních úseků	76

Seznam symbolů a zkratk

Označení	Popis	Jednotka
A	plocha	m^2
C_X	aerodynamický součinitel konstrukčního prvku	-
D	průměr vodiče s námrazou	m
D_{el}	elektrická vzdálenost	m
E	modul pružnosti materiálu	Pa
F_H	vodorovná složka síly resp. tahu ve vodiči	N
F_V	vertikální složka síly	N
F_x	síla ve směru osy x	N
F_y	síla ve směru osy y	N
G_q	nárazový koeficient větru	-
G_{DX}	dynamický koeficient konstrukčního prvku	-
I_d	návrhové zatížení námrazou na jednotku délky vodiče	N/m
I_{R50}	extrémní referenční zatížení námrazou	N/m
J	proudová hustota	A/m^2
K_h	součinitel výšky pro zatížení námrazou	-
K_{lc}	součinitel místních podmínek pro zatížení námrazou	-
M	moment síly	Nm
Q_{WX}	síla větru v kolmém směru na libovolný prvek	N
a	délka rozpětí	m
a_i	ideální délka rozpětí	m
a_k	kritické rozpětí	m
$a_{tíha}$	tíhové rozpětí	m
b	šikmá vzdálenost	m
c	parametr křivky	m
d	průměr vodiče bez námrazy	m
dl	element délky vodiče	m
f_k	charakteristický průhyb vodiče	m
f_m	maximální průhyb vodiče	m
f_v	viditelný průhyb vodiče	m
f_x	průhyb vodiče v libovolném místě	m
g	tíhové zrychlení	m/s^2
g_1	jmenovitá měrná hmotnost vodiče	kg/m
h	výška nad zemí resp. převýšení	m
h'	výškový rozdíl v místě viditelného průhybu	m
h_i	výškový rozdíl sousedních závěsů	m
k_1, k_2	integrační konstanty	-
k_T	součinitel terénu	-

l_0	délka vodiče při počáteční teplotě	m
l_A, l_B	délky větví řetězovky od příslušného závěsného bodu	m
l_{AB}	délka nesouměrní řetězovky	m
l_s	skutečná délka vodiče	m
m_r	hmotnost námrazy na tyči o průměru 30 mm	kg/m
q_1	zatížení vodiče bez námrazy	N/m
q_2	zatížení vodiče námrazou	N/m
q_h	dynamický tlak větru	N/m ²
q_{hcl}	dynamický tlak větru na omrzlý vodič	N/m ²
q_{WC}	jednotkové zatížení vodiče větrem	N/m
$v_{b,0}$	základní rychlost větru	m/s
v_g	nárazová rychlost větru	m/s
v_h	rychlost větru ve výšce h nad zemí	m/s
x_A, x_B	x-ová souřadnice závěsného bodu	-
x_k	vzdálenost bodu s charakteristickým průhybem od počátku	m
x_k	vzdálenost bodu s viditelným průhybem od počátku	m
y_A, y_B	y-ová souřadnice závěsného bodu	-
z	poměrné zatížení vodiče, přetížení vodiče	-
z_0	třetí výška	m
α	koeficient teplotní roztažnosti	1/°C
γ	měrná tíha vodiče	N/m ³
γ_G	dílčí pravděpodobnostní koeficient zatížení tíhou	-
γ_I	dílčí pravděpodobnostní koeficient zatížení námrazou	-
γ_W	dílčí pravděpodobnostní koeficient zatížení větrem	-
Δl	celková změna délky vodiče	m
Δl_{ϑ}	prodloužení vodiče na základě teplotní roztažnosti	m
Δl_{σ}	pružné zkrácení vodiče vlivem napětí	m
ϑ	teplota	°C
ϑ_{krit}	kritická teplota	°C
ρ	hustota vzduchu	kg/m ³
ρ_I	hustota námrazy	kg/m ³
σ_B	mechanické namáhání v závěsném bodě B	Pa
σ_{dov}	dovolené mechanické napětí	Pa
σ_H	vodorovná složka namáhání ve vodiči	Pa
σ_{Hkrit}	mechanické napětí pro kritickou teplotu	Pa
σ_V	vertikální složka namáhání ve vodiči	Pa
ϕ	úhel náběhu mezi uvažovaným směrem větru a rozpětí	°
ψ_{Wc}	dílčí pravděpodobnostní koeficient kombinovaného zatížení námrazou a větrem	-

Označení	Popis
AlFe lano	kombinované lano složené z ocelové duše a hliníkového obalu
ČEPS	ČEPS, a.s. - provozovatel přenosové soustavy v ČR
ČEPS Invest	ČEPS Invest, a.s. - technické a projektové řešení staveb přenosové soustavy ČR
ČEZ	ČEZ, a.s. - výrobce elektrické energie
ČEZ Distribuce	ČEZ Distribuce, a.s. - provozovatel distribuční soustavy v ČR
PVE	přečerpávací vodní elektrárna

1 Úvod

Dnes si člověk nedokáže představit svůj život bez elektroniky. Přístroje využívající elektrickou energii jsou všude kolem nás. Výpadek dodávky elektrické energie by mohl mít pro člověka fatální následky. Proto je důležitý správný návrh přenosových cest, aby se minimalizovala šance, že by k výpadku mohlo dojít. V České republice je venkovní vedení nejrozšířenějším způsobem pro rozvod elektrické energie.

Vedení musí vyhovovat řadě požadavků, aby bezpečně odolalo všem elektrickým i neelektrickým jevům. Funkce vedení nesmí být ohrožena různými klimatickými podmínkami, jako jsou extrémně vysoká teplota nebo zatížení námrazou případně větrem. Proto jsou na správný návrh venkovního vedení kladeny vysoké nároky. Vzhledem k tomu, že výstavba nového vedení je finančně náročná, je nutné vedení navrhnout tak, aby vyhovovalo, jak z hlediska bezpečnosti, tak i z pohledu finančních nákladů.

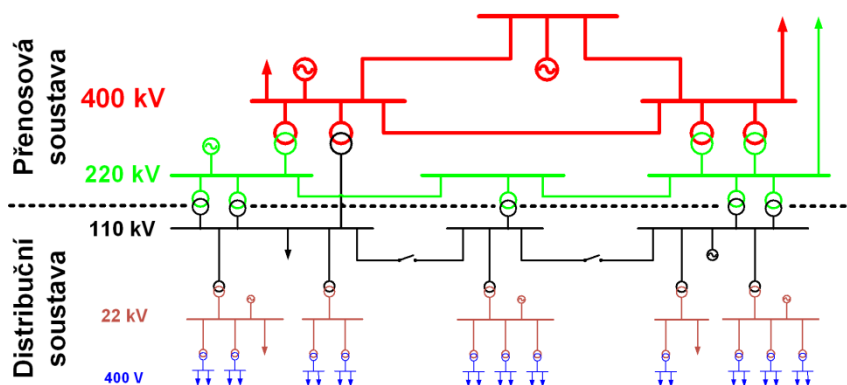
Vedení přenosové soustavy tvoří kostru celé elektrifikační sítě České republiky. Zajišťuje dodávku elektřiny pro důležité rozvodné uzly a jsou do ní vyvedeny výkony velkých výrobních zdrojů. Přenáší elektrickou energii na velké vzdálenosti a ve velkých objemech. Funkci přenosové soustavy můžeme přirovnat k dálnici, která má podobně důležitý význam v oblasti dopravy.

2 Elektrizační soustava

Člověk je v současné době závislý na elektřině. Používá ji jako výchozí zdroj energie, kterou následně přemění na pro něj v tu chvíli potřebnou veličinu, ať už je to teplo nebo energie pro napájení spotřebičů. Elektrická energie výrazně přispěla k vývoji průmyslu, obchodu i člověka samého. Díky tomuto přínosu je nutný neustálý vývoj přenosu elektrické energie k odběrateli. Vše komplikuje neúčinnost akumulace elektřiny a s tím spojená neustálá výroba. Tyto požadavky kladou vysoké nároky na přenos elektrické energie. Přenos zajišťuje elektrizační soustava. To je vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos a distribuci až ke konečnému spotřebiteli.

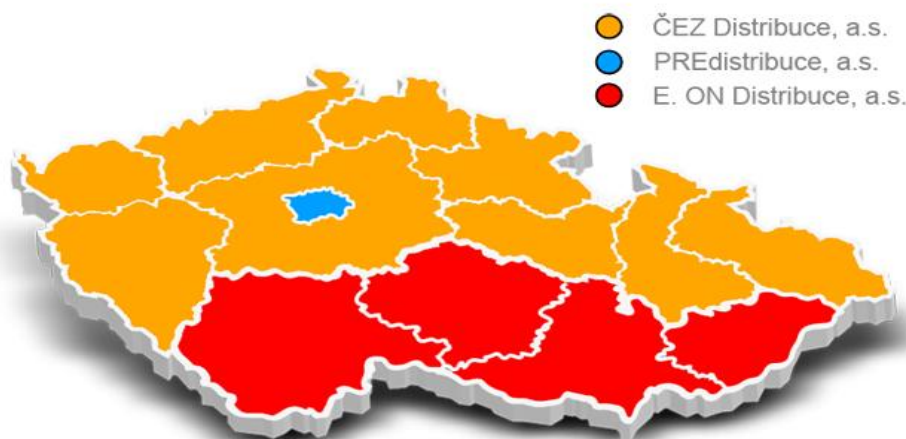
2.1 Dělení elektrizační soustavy

Jak již bylo zmíněno výše, elektrizační soustavu tvoří elektrické stanice, výrobní elektrické energie a elektrické sítě. Elektrizační síť dělíme na distribuční a přenosovou. Rozdělení elektrizační soustavy přibližuje následující obr. 1 [1].



Obr. 1 - Schéma elektrizační soustavy [1]

Distribuční soustava slouží k dodávce elektrické energie přímo ke spotřebiteli. Přenáší výkon na menší vzdálenost. Zajišťují ji nižší napěťové hladiny než 110 kV včetně. Rozvod je ve větší části ČR mezi městy a vesnicemi na hladině 22 kV a v průmyslu 10 či 6 kV. Z distribuční sítě jsou napájeny všechny domácnosti, veřejné prostory a průmyslové podniky. Do distribuční sítě jsou připojeny menší zdroje elektrické energie (např. malé vodní elektrárny). Kvůli své rozloze je provozována jako paprsková, případně průběžná. Toto zapojení nezajišťuje 100% jistotu dodávky elektrické energie. Distribuční síť je tvořena vzájemně nepropojenými oblastmi, které jsou napájeny z přenosové soustavy. Ke vzájemnému propojení distribučních soustav dochází jen v případech, kdy je potřeba pokrýt mimořádně vysokou spotřebu. Česká republika je rozdělena do tří oblastí dle distributora elektrické energie. Pro severní Čechy a severní Moravu zajišťuje dodávku elektřiny společnost ČEZ Distribuce, a.s., pro jižní Čechy, Vysočinu a jižní Moravu E.ON Distribuce, a.s. a pro Prahu potom PRE Distribuce, a.s. Rozdělení České republiky do distribučních oblastí dokresluje následující obr. 2 [2].



Obr. 2 - Distribuční oblasti ČR [2]

Přenosová soustava je v ČR složena z úrovní 220 kV a 400 kV. Vyšší napěťová hladina znamená menší ztráty při přenosu, a tak je vhodná k dopravě elektrické energie na velké vzdálenosti. Funguje jako kostra distribuční soustavy, kterou napájí. Je také připojena k okolním státům. Do přenosové soustavy jsou vyvedeny výkony největších zdrojů, jako jsou jaderné elektrárny (Temelín a Dukovany) nebo uhelné elektrárny v severních Čechách (Prunéřov, Tušimice, Počerady atd.) Z hlediska zapojení je přenosová soustava zapojena jako okružní síť. Toto zapojení umožňuje dodávku i při výpadku určité části vedení.

2.2 Vývoj přenosové soustavy

V České Republice byla poprvé využita elektrická energie v roce 1878 v Moravské Třebové pro osvětlení tkalcovny [3]. V tomto případě byla vyrobená energie spotřebována v místě výroby a odpadal tak problém s přenosem elektrické energie. To se ale postupem času změnilo, kvůli zvyšující se poptávce po využití v průmyslu. První elektrárnou, která zásobila své okolí stejnosměrným napětím, byla v Praze na Žižkově v roce 1889 [3]. Na přelomu století byl v Holešovicích uveden do provozu první střídavý generátor a díky možnosti transformace střídavého napětí na různé hladiny a tím menší ztráty při přenosu, odstartoval vývoj veřejné elektrizační soustavy na území České republiky.

Nejprve byla využívána hladina 110 kV. S rostoucí spotřebou elektrické energie a výstavbou velkých zdrojů se zvyšovala potřeba dopravy na velké vzdálenosti, a to v 60. letech 20. století vedlo k výstavbě vedení o napětí 220 kV. Kvůli nalezištím hnědého uhlí v severních Čechách došlo v 70. letech k vybudování několika uhelných elektráren a vedení 400 kV.

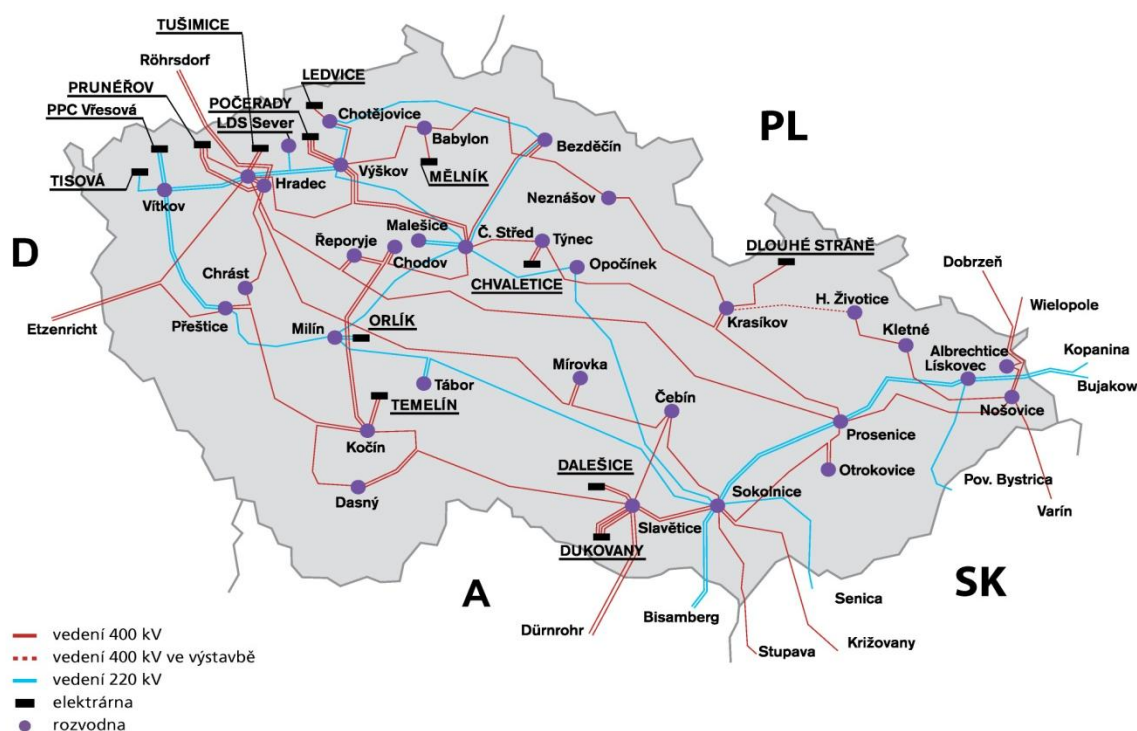
2.3 Současný stav přenosové soustavy

Provozovatelem přenosové soustavy v České republice je společnost ČEPS, a.s. (dále jen ČEPS). Přenosová soustava je provozována na hladinách 220 a 400 kV. Vedení 220 kV je

v současné době na ústupu a postupně nahrazováno vedením 400 kV. Součástí přenosové sítě je také 41 rozvoden. V majetku společnosti ČEPS je také malá část vedení o hladině 110 kV v okolí rozvodny Kočín. Současný stav přenosových sítí (schéma sítí 400 a 220 kV) je ukázán na obr. 3 [4].

Napěťové úrovně vedení ČEPS a jejich celková délka [5]:

- Vedení 400 kV 3 617 km (z toho dvojitě a vícenásobné vedení 1 338 km)
- Vedení 220 kV 1 909 km (z toho dvojitě a vícenásobné vedení 1 038 km)
- Vedení 110 kV 84 km (z toho dvojitě a vícenásobné vedení 78 km)



Obr. 3 - Schéma přenosové soustavy [4]

Přenosová soustava ČR je připojena na evropskou kontinentální síť, se kterou ji propojuje celkem 17 zahraničních vedení. Na každý ze sousedních států je připojena čtyřmi vedeními. Výjimku tvoří Slovensko, se kterým je to pět linek. Na území Evropy jsou přenosové sítě propojeny v jednu velkou kontinentální síť. Toto propojení zabraňuje výpadku jednotlivých států a otevírá možnost mezinárodního obchodování s elektrickou energií.

2.4 Elektrizační soustava - region severní Čechy současný stav

Elektrizační soustava v severních Čechách je specifická svým velkým množstvím elektráren. Díky velkým zásobám hnědého uhlí je zde spousta elektráren zpracovávajících právě tuto surovinu. Jsou to Tušimice (4x 200 MW), Prunéřov (5x 210 MW) a Počeradý (5x 200 MW) [6].

Oblast Podkrušnohoří je také vhodná pro umístění větrných parků. Ty jsou ovšem problematické svou velkou závislostí na aktuálních povětrnostních podmínkách.

Kvůli přítomnosti těchto zdrojů energie je zde vybudována hustá síť vedení a rozvodných stanic, které jsou vzájemně propojeny. Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí elektrizační soustavy v České republice. Hlavně protože je zde důležité propojení sítí mezi Českou republikou a Spolkovou republikou Německo, konkrétně vedení 400 kV V445 a V446 mezi rozvodnami Hradec - východ a Röhrsdorf.

V regionu se nachází 5 rozvodů přenosové soustavy. Směrem od západu to jsou Hradec (východ a západ), Výškov, Chotějovice, Babylon a Bezděčín. Tento region spadá pod oblast správy společností ČEZ Distribuce pod názvem oblast Sever. Společnost ČEZ Distribuce na tomto území vlastní 43 rozvodných stanic.

2.5 Elektrizační soustava - region severní Čechy výhled do budoucna

Dle [7] byla společností EGÚ Brno, a.s., na základě důkladného rozboru elektrizační sítě, zpracována analýza volné kapacity sítí v elektrizační soustavě České republiky, která poukázala na některé nedostatky. Rostoucí zájem investorů o vybudování nových obnovitelných zdrojů a následné připojení k distribuční síti je v mnoha oblastech kapacita zcela vyčerpána. Co se týče oblasti severních Čech, tak ta je již také na svém maximu. V této oblasti tak není možnost za stávajících podmínek připojovat další nové zdroje bez dalších investic a úprav.

Z hlediska budoucnosti přenosové sítě ČR je společnost ČEPS ze zákona povinna zpracovat podrobný desetiletý investiční plán. Následně je tento dokument podroben kontrole ze strany Ministerstva obchodu a průmyslu a je předán ke schválení, či zamítnutí Energetickému regulačnímu úřadu. Na základě Plánu rozvoje přenosové soustavy České republiky 2016-2025 [8] se oblasti severních Čech týkají následující změny:

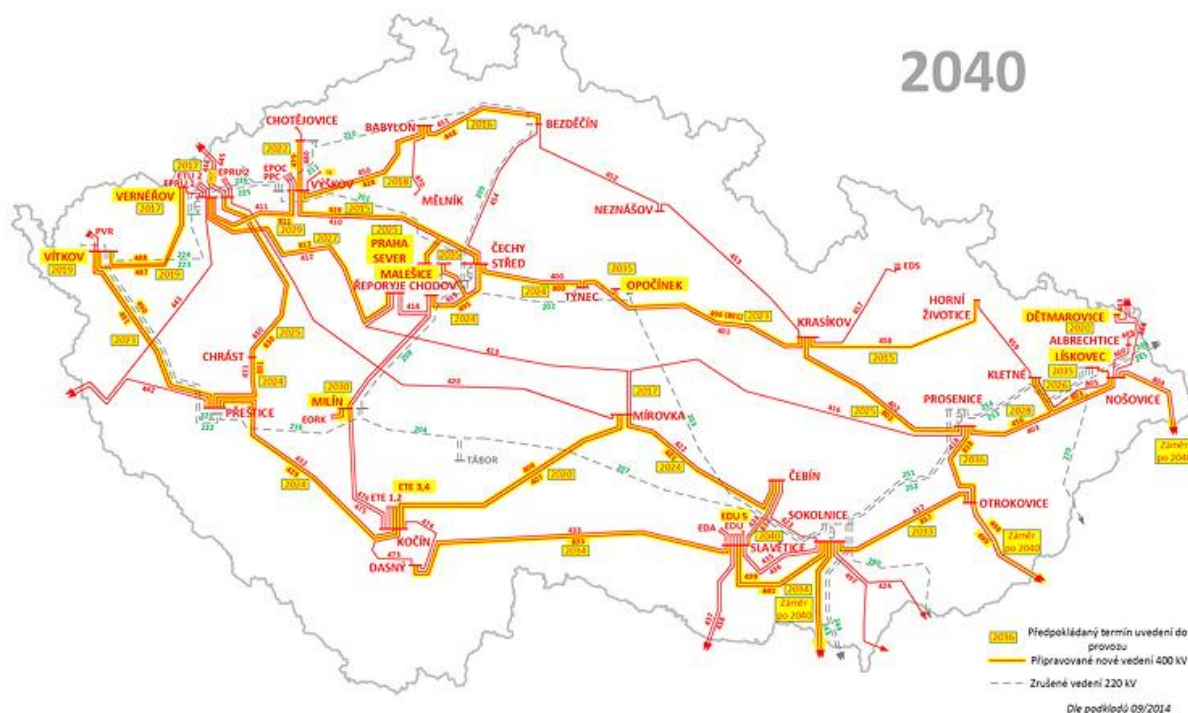
- Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Výškov - Babylon (V450)
- Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Babylon - Bezděčín (V451)
- Rozšíření rozvodů Výškov, Bezděčín a Babylon

Na základě analýzy společností OTE ve spolupráci s EGÚ Brno, a.s. byl vypracován výhled energetiky do roku 2050 [9]. V tomto dokumentu byly popsány změny v elektrizační soustavě, zejména v přenosové síti. Změny týkající se oblasti severních Čech jsou následující:

- Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Chotějovice - Výškov (V480)
- Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Hradec - Výškov (V411)
- Zrušení stávajícího vedení 200 kV Výškov - Chotějovice (V211)
- Zrušení stávajícího vedení 200 kV Chotějovice - Bezděčín (V210)

Podle OTE a jejich výhledu do situace přenosových sítí v budoucnu (rok 2050) [10] je v plánu posilování vedení 400 kV zejména v oblasti severozápadních a jižních Čech, jižní Moravy

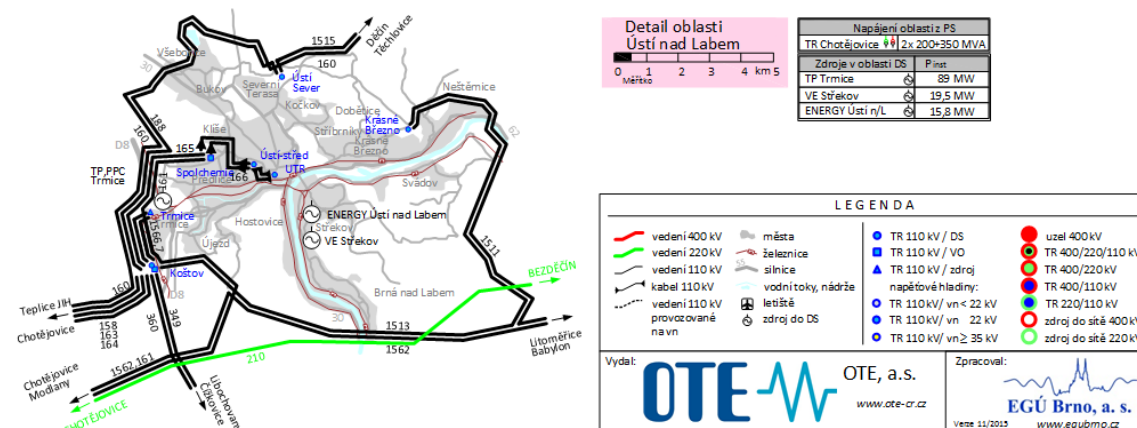
a dalších regionech. Zajistí se tím vyvedení výkonu stávajících i nově vybudovaných zdrojů, i spolehlivý provoz soustavy během tranzitních přenosů výkonu z Německa přes naše území. Pro koncepci rozvoje přenosové sítě v dlouhodobém horizontu je nejdůležitější informací fakt, že se chystá postupný přechod přenosové sítě na jednotnou napěťovou úroveň 400 kV. Náhrada napěťové úrovně 220 kV by měla být dokončena okolo roku 2040 [10]. Rozvoj distribučních sítí bude ovlivněn především neustále rostoucí decentralizací výroby. To bude vyžadovat výraznější posilování distribučního vedení na úrovni VN a NN. Předpokládaný vývoj přenosové soustavy v roce 2040 zobrazuje následující obr. 4 [10].



Obr. 4 - Výhled PS v roce 2040 [10]

2.6 Ústí nad Labem - elektrizační soustava

Město Ústí nad Labem leží v severních Čechách na břehu řeky Labe. Asi 20 km na východ leží rozvodna Chotějovice. Z této rozvodny vede linka 220 kV do rozvodny Babylon, která těsně míjí Ústí nad Labem. Město je obklopeno dokola vedením 110 kV, které je napájeno zejména z rozvodny v Chotějovicích nebo z vlastních zdrojů poblíž města. Schéma elektrizační soustavy v okolí Ústí nad Labem je zachyceno na obr. 5 [11].



Obr. 5 - Elektrizační síť v okolí ÚnL (modifikováno z [11])

Ve městě Ústí nad Labem jsou celkem tři výrobci elektrické energie s instalovaným výkonem vyšším než 1 MW.

Prvním z nich je Teplárna Trmice, o které dle [12] byly zjištěny následující informace. V teplárně je instalováno 6 kotlů o celkovém výkonu 469,2 MW a 6 turbogenerátorů o celkovém výkonu 89 MW. Teplárna má připojených více než 1 300 odběrných míst. Generátory TG 6,7,8 vyvádí výkon přes blokové transformátory do rozvodny 35 kV a dále do rozvodny 110 kV. Z této rozvodny jsou napojeny přenosové linky 110 kV ČEZ Distribuce. Generátory TG 4,5 jsou vyvedeny přímo do rozvodny 110 kV. V majetku Teplárny Trmice je také kogenerační jednotka s výkonem 70 MW. Výkon z této jednotky je vyveden přímo do rozvodny 110 kV.

Dalším důležitým zdrojem elektrické energie je vodní elektrárna Střekov. Tato vodní elektrárna je v majetku společnosti ČEZ. Celkový instalovaný výkon činí 19,5 MW [13]. Tato vodní elektrárna je osazena třemi Kaplanovými turbínami. Vyrobenou elektřinou by mohla zásobovat 50 tisíc domácností.

Třetím výrobcem je Energy Ústí nad Labem, a.s. Tato elektrárna má instalovaný výkon o hodnotě 15,8 MW. Tento výkon je vyveden do sítě 22 kV [14].

3 Elektrické vedení

Máme dva základní typy elektrického vedení využívané pro přenos elektrické energie v elektrizační soustavě. Prvním typem je klasické venkovní vedení. Venkovní vedení se skládá ze dvou základních částí, vodičů ve formě lan a stožárů. Proudovodnou dráhu tvoří vodiče, stožáry plní funkci nosnou a izolační. Lana jsou zavěšena na stožárech pomocí izolátorů. Důležitou součástí venkovního vedení jsou zemníci lana. Ta slouží primárně k ochraně při úderu blesku do vedení, ale mohou být využity i pro komunikaci mezi rozvodnami.

Volba vodičů patří k nejdůležitějším při návrhu vedení. Výběr správného vodiče výrazně ovlivní cenu celého vedení (typ stožáru, izolátory, nosné prvky a další). Hlavně musí zajistit požadovanou bezpečnost. Vodiče musí odolat výrazným změnám klimatických podmínek, a proto jsou na ně kladeny zvláštní nároky, často protichůdné [15]:

- malá hmotnost vodičů pro snazší instalaci, ale naopak velká, kvůli stabilitě při působení větru
- malý průměr pro omezení účinků větru, ale velký pro omezení ztrát korónou
- velká mechanická pevnost
- odolnost proti chemickým vlivům a změnám teploty
- nízká cena

Proto je nutné zvolit určitý kompromis v těchto požadavcích. Tento kompromis se odvíjí od oblasti použití, tak aby navržené vedení vyhovovalo co nejlépe. Pro montáž venkovního vedení jsou v největším množství využívána kombinovaná lana, především AIFe.

Zvlášť u přenosových soustav se setkáváme s typickým zapojením lan do takzvaných trojsvazků. Jde v podstatě o tři samostatné vodiče, které jsou od sebe udržovány v trojúhelníkovém tvaru izolačními držáky, které zabráňují samovolnému pohybu a dotyku vodičů. Zapojení do trojsvazků má za výsledek výrazné zmenšení ztrát korónou.

Druhým typem vedení je kabelové vedení. Využití tohoto typu v přenosové soustavě je zvlášť ojedinělé. Často je využíváno v distribučních soustavách. V tomto zapojení je izolovaný vodič veden v zemi. Výhodou je menší vzájemná vzdálenost mezi vodiči a fakt, že typ tohoto vedení není vidět v krajině. Tento druh vedení se ovšem setkává také s výraznými nedostatky. První je finanční náročnost realizace. Další nevýhodou je složitá údržba kabelu. Obrovskou komplikací u tohoto typu uložení je vyšší kapacitní reaktance kabelu, a při přenosech na velké vzdálenosti nutnost tuto složku kompenzovat.

3.1 Vodiče pro vedení VVN

Na elektrických vedeních se mohou vyskytovat 3 druhy vodičů. To jsou fázové vodiče, zemníci lano a kombinované zemníci lano. Nejdůležitějším z těchto tří druhů je fázový vodič. Ten má za úkol přenesení energie z místa A do místa B. Fázové vodiče jsou hospodářsky rozhodujícím

faktorem. Při jejich přetržení dochází nejen k přerušení dodávky, ale mohou ohrozit bezpečnost okolí (např. způsobit požár). Proto jsou na tento typ vodičů kladeny speciální nároky (viz výše). Vodiče mohou být realizovány jako obyčejné dráty nebo jako lana. Použití prostých drátů je omezené, kvůli jejich špatným mechanickým vlastnostem a jsou instalovány zejména v rozvodech NN. V současnosti jsou využívána především lana. Tato lana jsou točená většinou po směru hodinových ručiček. Lana jsou svou ohebností výhodnější než dráty.

Zvyšování parametrů vodičů je nazýváno jako tzv. „uprating“. Tyto metody přibližuje Tab. 1 [16]:

Tab. 1 - Metody „upratingu“ [16]

Zvyšování	Metoda	Nástroj
proudu	zvýšení teploty	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče
		změna mechanického tahu ve vodiči
	výměna vodičů	kompaktní / hladké vodiče
		vysokoteplotní vodiče
	speciální metoda	statistické metody
		metody reálného času
napětí	izolace	výměna / přídavných izolátorů
		modifikace uchycení
	vzdálenost vůči zemi	zvětšení výšky závěsného bodu vodiče
		změna mechanického tahu ve vodiči
	mezifázová vzdálenost	změna dvojitého vedení na jednoduché
		nová hlava stožáru

Při zvýšení napětí nebo proudu pochopitelně vzroste přenášený výkon. Zvyšování hodnoty napětí daného vedení je finančně náročné. Při zvětšení protékajícího proudu jsme výrazně limitováni maximálním dovoleným oteplením vodiče. Při zvýšení teploty se také na základě teplotní roztažnosti látek vodič nezanedbatelně prodlouží, a může tak dojít k nebezpečnému průvěsu vedení. Tomuto problému můžeme předejít vyšším zavěšením vedení, větším napnutím vodiče nebo instalací speciálního typu vodiče.

Lana jsou oproti drátům častěji využívány a mají výhodnější vlastnosti. Jsou ohebnější a z provozního hlediska bezpečnější. Tato bezpečnost je zajištěna tím, že lana jsou složena z většího počtu menších drátů. U drátů může materiálová chyba ovlivnit vlastnost celého vodiče, kdežto u lana porucha, nebo dokonce přetržení jednoho drátu, nezpůsobí zásadní ovlivnění vlastností celku.

Zemnicím lanem nazýváme vodič, který je úmyslně uzemněn. Tento vodič se nachází na nejvyšším možném místě vedení a to nad fázovými vodiči. Počet zemnicích lan je závislý

na typu stožáru. Zemní lano není určeno k přenesení výkonu, ale má neméně důležitou funkci, a tou je ochrana vedení při úderu blesku. Tento jev je poměrně častý, jelikož elektrické vedení je obvykle umísťováno do holé krajiny a je vysoké desítky metrů. Ovšem tohle není jediné poslání zemního lana. Neméně důležitou funkcí je zmenšení přepětí vzniklého elektrostatickou indukci, zmenšení krokového napětí a proudu jdoucího do země při zkratech na vedení. Dle [17] : „*Praxe ukázala, že dobře uzemněné zemní lano chrání dobře vedení proti blesku, že zmenšuje i napětí indukovaná blesky a že tlumí vlny na vedeních. Z rozboru i z pokusů na modelech vyplývá, že zemní lano chrání prostor pod vedením dobře v úhlu 30° a skoro úplně v úhlu 20°.*” U ocelových stožárů se zemní lano spojuje s konstrukcí stožáru, která se dole spojí svorkou se zemní elektrodou, aby bylo možno měřit její odpor.

Zemní lano není nijak konstrukčně odlišné od fázových vodičů. V dnešní době je u konstrukce zemních lan požadována co nejvyšší vodivost, aby bylo co nejvíce proudu přeneseno právě nimi a co nejméně přes stožárovou konstrukci do země. Dříve byla využívána dokonce železná lana.

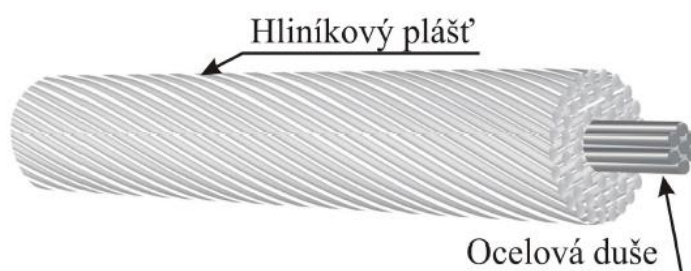
Třetím druhem vodiče je kombinované zemní lano. Informace o tomto druhu vodiče byly zjištěny z literatury [18] Na vedení bývá uvedeno vždy zemní lano klasické nebo právě kombinované. Toto lano se liší od klasického zemního pouze tím, že ke všem výše zmíněným funkcím přidává možnost komunikace po vedení. Klasický způsob komunikace po vedení se nazývá Hromadné Dálkové Ovládání (HDO). Novějším typem tohoto kombinovaného zemního lana je zavedení několika optických vláken dovnitř. Optických vláken většinou bývá více, než potřebuje správce přenosové či distribuční sítě ke komunikaci. Nevyužitá vlákna jsou poskytována k pronájmu soukromým podnikům, jako jsou televizní sítě, internetové společnosti či případně potřebám armády nebo policie.

Kombinované zemní lano je označováno většinou jako OPGW (Optical Ground Wire). Konstrukce je taková, že uvnitř hliníkového pláště jsou umístěna optická vlákna. Na hliníkovém plášti jsou navinuty samotné vodiče. Hliníkový plášť dobře chrání vlákna proti elektromagnetickému poli a informace tak mohou nerušeně proudit optickým vláknem. Tenhle hliníkový obal také chrání optická vlákna při úderu blesku, kdy díky skin efektu je tento obrovský proud veden po povrchu vodiče a neporuší tak optická vlákna. Další ochranou funkcí při úderu blesku je větší vysoký nárůst teploty vodiče, a mohlo by tak dojít k poškození optických vláken. Z tohoto důvodu by měla být maximální teplota absorbovaná hliníkovou trubičkou nižší než nejvyšší přípustná teplota optických vláken.

V současnosti je také pro komunikaci po vedení využíváno speciálních typů fázových vodičů a to OPPW (Optical Phase Wire). Tento typ vodiče má uvnitř také optické vlákno sloužící opět ke komunikaci nebo přenosu informací o oteplení vodiče. Znalost teploty vodiče dovoluje řídit zatížení daného vodiče s ohledem na jeho teplotní limity tak, aby nedošlo k jeho poškození [18].

3.2 Materiál vodiče

Pro vedení VVN se nejčastěji využívají lana ze slaněných vodičů. Tato lana se skládají z duše, která má horší vodivost, ale naopak zajišťuje mechanickou pevnost a nese tíhu samotného vodiče. Obal je složen ze slaněných vodičů, které kvůli přítomnosti skin efektu tvoří samotnou proudovodnou dráhu. Nejčastěji jsou využívána AlFe lana. U tohoto typu jsou na železné duši šroubovitě navinuty hliníkové dráty tvořící elektrovodnou část. AlFe lano nejlépe vyhovuje požadavkům pro venkovní vodiče. Kloubí v sobě dobré vodivostní vlastnosti hliníku s pevností oceli. Velký průměr vodivého lana navíc omezuje působení koróny. Nevýhodou je větší náchylnost k vibracím. Na obr. 6 [15] je zobrazen model AlFe lana.



Obr. 6 - Konstrukce kombinovaného lana [15]

Dle [15] se se zvyšujícími nároky na venkovní vodiče v poslední době začaly objevovat vodiče na bázi různých slitin. Cílem je zlepšení přenosových vlastností těchto vodičů. Hojně využívány jsou slitiny hliníku, pro jeho dobré vodivé vlastnosti při zachování přijatelných mechanických vlastností. Nejčastější je slitina hliníku, hořčíku a křemíku.

Své místo má také pozinkovaný ocelový drát označovaný jako ST1A, ST2B, ST3D, ST4A, ST5E a ST6E. V označení číslice charakterizuje jakost a písmeno třídu. Tento typ vodiče se využívá pro zpevnění vodičů venkovního vedení VVN. Pozinkování slouží jako ochrana proti korozi ocelového drátu. Výsledné vlastnosti vodiče závisí na kombinaci jakosti oceli a třídě zinkového povlaku.

3.3 Požadavky na vodiče

Kapitola o požadavcích na vodiče čerpá z literatury [19].

Velikost vodičů využívaných v ČR nejsou uvedeny v příloze normy ČSN EN 50182. Správce přenosové soustavy ČR, společnost ČEPS, doporučuje využívat na nově budovaných vedeních kombinovaná lana s hliníkovými dráty AL1 a duši z ocelových pozinkovaných drátů ST1A nebo ST6C. Je možné využít jiný typ, ale je nutné, aby vyhovovaly výše zmíněné normě.

Dráty musejí být kruhového průměru a nesmí se na jeho povrchu vyskytovat žádné stopy mechanického poškození, jako jsou oděrky, zářezy nebo například vrypy. Tohle poškození by způsobilo zhoršení vlastností vodiče. Kontrola se provádí vizuálně.

Všechny dráty musí být slané tak, aby vždy byly sousední vrstvy slané v opačném směru a směr vnější vrstvy byl pravotočivý. Výška vinutí je od středu vnitřní duše v celém průřezu konstantní. Norma ČSN EN 50182 stanovuje stáčecí poměry pro různá lana. Stáčecí poměr je podíl výšky vinutí dané vrstvy k vnějšímu průměru. Ocelové pozinkované dráty a duše nemůžeme nijak vzájemně spojovat.

Při návrhu je důležitá také hmotnost navrhnutého vodiče. Snažíme se o využití co nejlehčího vodiče, přičemž chceme zachovat jeho mechanické vlastnosti. Výpočet hmotnosti vodiče provádíme na základě známých parametrů (hustota materiálu a průřez). Při slánění vodičů do svazků si musíme uvědomit důležitý fakt, že samotná délka využitého vodiče bude ve skutečnosti delší, než je délka ocelové duše, protože se točí okolo této duše. Při výpočtu nesmíme zapomenout na hmotnost maziva, které se využívá u kombinovaných lan ALx a STyz, naopak lana s pozinkovanou duší nemusí být namazána.

Musíme mít na paměti také minimální pevnost drátu v tahu. Ta je dána jako součin průřezu a tabulkové hodnoty minimální měrné pevnosti pro daný typ vodiče. U lana složeného ze stejného druhu drátů můžeme sečíst jednotlivé pevnosti dílčích drátů, abychom získali výslednou pevnost celého lana. U kombinovaných musíme vzít v potaz fakt, že duše může být namáhána více a výpočet tomu uzpůsobit.

Poslední ovšem jednou z nejdůležitějších vlastností je výsledná rezistivita vodiče. Spočítáme ji jako součin délky a jmenovité hodnoty rezistivity při teplotě 20 °C vztažené na element (kilometr nebo metr) vodiče. Výpočet se nijak neliší podle toho, jestli se jedná o jednoduchá nebo kombinovaná lana. U kombinovaných lan uvažujeme skinefekt, tudíž proudovodnou drahou bude vnější část lana, která je k tomu určena.

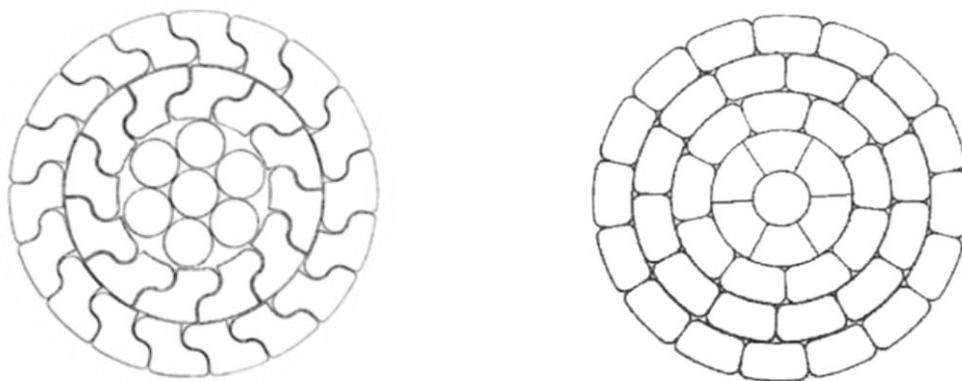
3.4 Tvary vodičů

Jak již bylo výše zmíněno, pro výstavbu vedení zvláště vysokého případně velmi vysokého napětí využíváme nejčastěji lana. Jak mohou být tato lana vlastně uspořádána? Tímto tématem se zabývá článek [20], ze kterého tato kapitola čerpá. Nejčastější jsou slaná lana z drátů kruhového průřezu. Při prosté představě tohoto lana si můžeme všimnout, že jednotlivé dráty kruhového průřezu na sebe nedosednou dokonale a v konstrukci budou vznikat malé vzduchové mezery, které mohou ovlivnit výsledné vlastnosti lana. Výrobci se snaží tento nedostatek zlepšit užitím lepších tvarů, které do sebe lépe zapadnou. Těmito typy jsou lana typu Z a segmentová lana.

Lana typu Z díky svému tvaru, který kopíruje profil okolních drátů, do sebe lépe zapadají a vytváří mnohem menší dutinky. Zmenšením těchto dutinek bylo umožněno snížit odpor oproti klasické kruhové konstrukci. Potlačení vzduchových mezer ovšem zapříčiní nárůst hmotnosti vodiče. Při dimenzaci lana z hlediska odporu můžeme díky Z tvaru drátů snížit průřez drátu natolik, že bude výrazně méně namáhán větrem, a tím i dosáhneme i menšího výsledného namáhání stožáru. Další nespornou výhodou tohoto tvaru je omezení vlivu koroze, a tím i pomalejší stárnutí lana.

Z hlediska vlivu vibrací na vedení se názory různí. Výrobce uvádí, že kompaktnost vrstvy přináší až 2x rychlejší tlumení vibrací, ale na druhou stranu soudržnost vrstvy omezuje vzájemný posuv vrstev vůči sobě, což může značně omezit schopnost samotného lana vibrace utlumit. Jisté zlepšení pozorujeme u jevu známého jako tančení vodičů, které se projevuje od určité rychlosti větru. Použitím Z lan se rychlost větru potřebná k „roztančení“ vodičů zvýší. Další výhodou pozorujeme u vytváření koróny. Vytvořením hladšího povrchu se snižuje možnost vzniku tohoto výboje. Výhodnější je také při tvorbě námrazků, kde bylo zjištěno, že se tvoří 1,5 až 3 krát méně než u klasického vedení.

Segmentovaná lana jsou tvořena z lichoběžníkových drátů. Segmentované vodiče mají velice podobné vlastnosti, jako výše zmíněná lana tvaru Z. Vzájemný rozdíl pozorujeme u zmenšení tuhosti lana, protože drží mnohem méně u sebe. Vzájemné srovnání těchto lan nabízí následující obr. 7 [20].



Obr. 7 - Tvary vodičů [20] : a) Vodič typu Z b) Segmentovaný vodič

3.5 Typy vodičů

Informace o následujících typech vodičů byly zjištěny v [20].

ACSR (Aluminium conductor steel reinforced)

U nás je známé jako AlFe lano. Je to nejčastěji využívaný typ vodiče. Jeho nosným prvkem je ocelová duše a proudovodnou dráhu tvoří spletené dráty z tvrdě taženého hliníku. Jádro tohoto lana je zkonstruováno z pozinkovaných drátů s velkou pevností. Vzájemnými poměry průřezů ocelové duše a hliníkového obalu je možné upravit vlastnosti tohoto lana dle potřeby (např. zvětšením duše zlepšíme pevnost lana, ale ublížíme vodivosti a naopak). Pro zlepšení vlastností je často využíváno segmentovaného provedení jednotlivých drátů. Vyrábí se v různých variantách dle poměru hliníku k oceli. Například AlFe3 (poměr hliníku k průřezu oceli je 3:1) nebo AlFe4 (1:4). Nejčastěji užívané je lano AlFe 240/39.

AAC (All aluminium conductor) a AAAC (All aluminium alloy conductor)

Tyhle typy vodičů jsou celé z hliníku. Vodič AAC je vytvořený z čistého hliníku bez žádných příměsí, kdežto AAAC je vyroben ze slitiny hliníku, manganu a křemíku. Oproti klasickým ACSR jsou tyto vodiče výrazně lehčí a můžeme je využít v situacích, kdy potřebujeme ušetřit hmotnost vodiče pro menší namáhání v závěsných bodech. Oproti ACSR mají také lepší tepelné vlastnosti. To znamená, že při vyšších teplotách bude výrazně menší průhyb. Jak již plyne z předchozí specifikace, nemají tato lana žádnou ocelovou duši, což zlepšuje odolnost proti korozi. Užitím vhodného maziva tak získáme ideální vodič do přímořských oblastí.

ACAR (Aluminium conductor alloy reinforced)

Lano s hliníkovými prameny vrchních vrstev a jádrem tvořeným ze slitiny hliníku. Tento typ je využíván jako vodič vzdušných přenosových a distribučních vedení. Dobrý poměr pevnosti a hmotnosti předurčuje toto lano použití v tom případě, kdy je při návrhu vedení prvořadý dovolený proud a mechanická pevnost. Při stejné hmotnosti vodiče ACSR a ACAR, poskytuje ACAR vyšší mechanickou pevnost a vyšší dovolený proud.

3.5.1 Vysokoteplotní vodiče

Když chceme přenést vyšší výkon po vedení, existují dvě varianty jak to zajistit. Prvním je zvýšení napěťové hladiny, což znamená kompletní výměnu vedení. Druhou variantou je větší proudové zatížení vedení. To ale přináší vyšší nároky na materiál vodičů. Užitím zvláštního typu tzv. vysokoteplotních vodičů, které umožňují provoz při vyšších teplotách, dosáhneme větší zatížitelnosti vedení. Tyto vodiče jsou vyráběny ze speciálních slitin tak, aby při vyšších teplotách zachovaly své vlastnosti. Většina vodičů má podobnou konstrukci jako vodiče ACSR. Jádro vodiče je pro lepší mechanické vlastnosti z nejrůznějších druhů oceli a plášť ze slitin hliníku. Vysokoteplotní vodiče jsou rozděleny a blíže specifikovány v [21] ze které tato kapitola čerpá.

(Z)TACSR ((Super) Thermal alloy conductor steel reinforced)

Tento typ vodiče je hodně podobný klasickému typu ACSR. Jejich rozdíl spočívá v tom, že u tohoto teplotně odolného vodiče jsou vnější dráty z teplotně odolného hliníku TAL nebo ze zvlášť odolného hliníku ZTAL. Vlastnosti tohoto vodiče jsou ovlivněny jak materiálem pláště (hliník), tak jádrem (ocel). Právě proto se příliš neliší od vodičů ACSR. Jejich odolnost vůči vyšším teplotám výrazně zvedá dovolené proudové zatížení, avšak jejich umístění je vhodné jen do míst, kde bude i při zvýšených teplotách dále zachována bezpečná vzdálenost od terénu a křižovatek (silnice, železnice, další vedení a jiné).

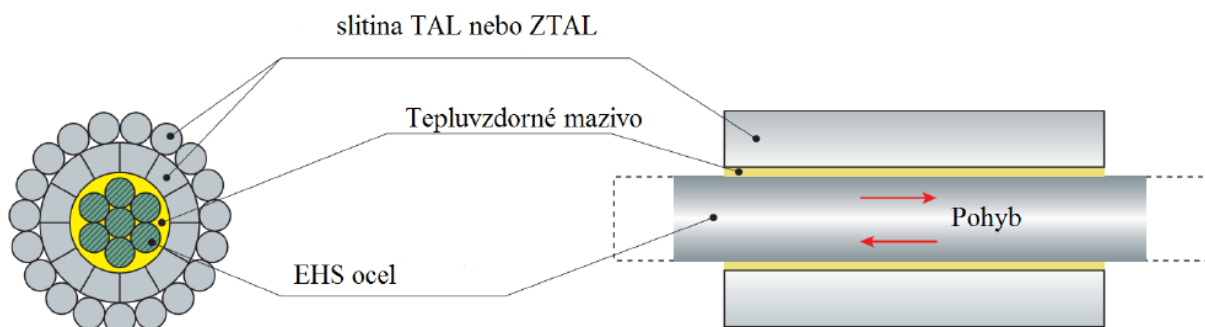
G(Z)TACSR (Gap (super) thermal alloy conductor steel reinforced)

Konstrukce tohoto typu vodiče už se výrazně liší od typu ACSR. Mezi jádrem z oceli o vysoké pevnosti EHS (Extra high strength) a pláště z teplotně odolného hliníku TAL nebo ZTAL je mezera. Mezera je vyplněna mazivem, které je schopné odolat vysokým teplotám. Pro lepší

využití maziva je vrstva pláště nejbližší jádra složena ze segmentovaných vodičů. To dokazuje obr. 8 [21], kde je zobrazen model tohoto typu lana. Oproti klasickým vodičům ACSR má dvě výhody. Díky tomu že ke konstrukci můžeme využít speciálních slitin, se výrazně zvyšuje jeho proudová zatížitelnost. Budeme-li uvažovat vodič o stejném průměru a nahradíme ho speciálním ze slitiny TAL tak získáme až 1,5x větší možné proudové zatížení. Pokud bychom využili slitinu ZTAL, tak ta nám umožní dokonce až dvojnásobné proudové zatížení oproti klasickému ACSR. Druhou výhodou je zmenšení průhybu vodiče.

Využití těchto nových typů lan nemá jen samé klady. Nevýhodou je složitější montáž. Při instalaci je nutné rozplést vnější hliníkový obal, následně napnout ocelovou duši na požadovaný tah a nakonec zase hliníkový obal zpět navít na jádro. Druhou nevýhodou je jejich poněkud vyšší cena než klasických ACSR lan.

Typ tohoto lana je výhodný při modernizacích nebo zesilování stávajícího vedení. Pokud bychom chtěli u klasického lana zvětšit proudovou zatížitelnost, tak se výrazně zvětší průhyb vedení, což může vést až k nesplnění normou udaných bezpečných vzdáleností od terénu. Následovala by tak složitý proces navyšování stávajících stožárů. Při instalaci vodiče GZTACSR nebo GTACSR stačí využít speciální svorky pro uchycení těchto dvou typů. Stožár ovšem může zůstat zachován původní, protože tyto vodiče budou mít při daném zatížení menší průhyb a bude tak zachována minimální vzdálenost vodiče od terénu.



Obr. 8 - Vodič typu G(Z)TACSR [21]

ZTACIR (Zirconium alloy aluminium conductor invar steel reinforced)

Tento typ je také podobný klasickému lanu ACSR. Jádro je ze speciální slitiny známé jako invar. Je to slitina železa a niklu v poměru 64 % železa a 36 % niklu, dále je zde v menší míře příměs uhlíku a chromu. Tato slitina je charakterizována malým koeficientem teplotní délkové roztažnosti, což z něj dělá ideální materiál pro výrobu drátů. V porovnání s dušemi vyrobených z oceli, je tento koeficient zhruba třetinový. Plášť je opět z teplotně odolných slitin hliníku (TAL nebo ZTAL). Nevýhodou tohoto typu lana je menší pevnost tahu slitiny invar. Výsledkem toho má vodič ZTACIR zhruba o 8 % menší pevnost než ACSR. Na rozdíl od předchozího typu teplotně odolného vodičů zde odpadá problém s rozplétáním pláště při instalaci.

ACSS (Aluminium conductor steel supported)

Jádro tohoto lana je tvořeno z oceli, kolem kterého je navinut plášť z plně žíhaných hliníkových drátů. Jelikož jsou hliníkové dráty žíhány, tak se zvýší jejich teplotní odolnost. Touto úpravou hliníku také zajistíme vyšší odolnost lana vůči korozi. Výhoda vodiče ACSS oproti klasickému ACSR je nejen vyšší teplotní odolnost, ale také je schopno částečně utlumit vibrace. Komplikace nastává opět při montáži. Plášť z plně žíhaných hliníkových drátů je více náchylnější vůči mechanickému poškození, a tak je potřeba s nimi zacházet opatrněji.

ACCC (Aluminium conductor composites core)

Tento typ moderního vodiče je složen z kompozitního jádra a pláště složeného z plně žíhaného hliníku seskládaného ze segmentů. Rozdíl oproti předešlým typům spočívá především v konstrukci jádra. To je tvořeno z jednoho drátu, který je lepen z karbonových vláken, která jsou obalena speciálními skelnými vlákny. Jádro je tak mnohem pevnější a není tak závislé na teplotě. Celkové vlastnosti tohoto typu lana se vyznačují mnohem menší teplotní roztažností (oproti invaru je poloviční, oproti klasickým vodičům dokonce osminová). Kompozitní jádro je výrazně lehčí než ocel (cca o 60 %). Tento typ nalézá uplatnění v situacích, kdy potřebujeme co nejmenší průhyb mezi stožáry, abychom zachovali bezpečnou vzdálenost od terénu.

3.5.2 Speciální typy vodičů

Mezi speciální vodiče patří antivibrační lana a duté vodiče. Tyhle typy jsou přiblíženy v [22].

Antivibrační lana

Antivibrační lana se skládají z dutého obalovaného lana, které je opletené čistými hliníkovými dráty a nebo Aldrey (slitina hliníku). Uvnitř dutého lana je ocelové lano, které je uloženo volně. Obě lana jsou napnuté různým tahem (ocelové větším), takže jejich vlastní frekvence jsou různé a nemohou se působením větru navzájem rozkmitat. Z tohoto důvodu je možné použít jako aktivní ochranu před vibracemi. Je to poměrně drahé řešení, protože vyžaduje speciální svorky a zvláštní napínání lan.

Duté lana

U vedení VVN a ZVN hrají ztráty způsobené korónou důležitou roli. Tyto ztráty jsou nepřímo úměrné průměru vodiče. Kvůli této skutečnosti se začal zvětšovat průřez vodičů, ale z hlediska proudové zatížitelnosti byl naddimenzovaný a navíc nabýval na hmotnosti. To zapříčinilo nástup dutých vodičů. Uvnitř dutého vodiče je spirálovitě navinutá pružina obvykle profilu T nebo I, která zabraňuje zploštění vodiče. Tento typ vodiče také vyžaduje speciální svorky.

4 Stožáry

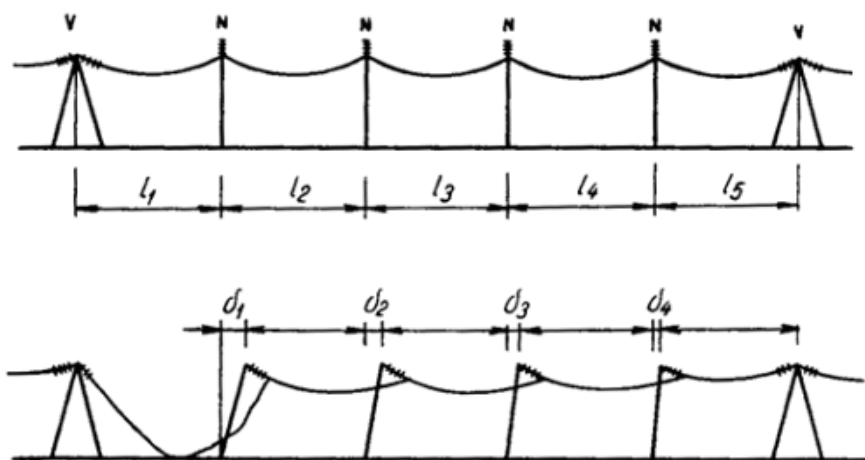
Stožáry jsou neodmyslitelnou součástí jakéhokoliv venkovního vedení. Jejich využití je klíčové, vzhledem k možnostem realizace kabelového vedení. Toto řešení se kvůli vysoké ceně vyskytuje pouze výjimečně. Je to zejména v situacích, kdy je vyloučena stavba klasického venkovního vedení z prostorových důvodů. Typicky je tento typ využíván v městské zástavbě. Jak už bylo zmíněno výše v úvodu kapitoly 3.

Hlavní funkcí stožárů je udržet bezpečnou vzdálenost mezi vodiči pod napětím a zemí. Plní tak funkci nosnou i izolační. Bezpečná vzdálenost od země je udána normou a odvíjí se od napěťové hladiny daného vedení. Při teplotních zatížení, zatížení námrazou nebo větrem se zvětšuje průvės daného vodiče, až může dojít k nebezpečnému přiblížení vodičů k povrchu a ohrozit tak bezpečnost vedení nebo jeho okolí.

4.1 Druhy stožárů

Dlouhá vedení VVN a ZVN se staví tak, že zhruba každé tři až pět kilometrů je takzvaný kotevní stožár. Mezi těmito kotevními stožáry je několik nosných stožárů. Vzdálenost nosných stožárů je různá. Pohybuje se od 350 metrů, pro stožáry v mírných klimatických podmínkách, až po 150 metrů pro vysoce námrazové oblasti [22]. Z toho plyne, že nosné stožáry převládají nad kotevními. V důležitých oblastech, složitém terénu nebo různém výškovém profilu mohou převládat kotevní stožáry.

Kotevní (výztužný) stožár musí vydržet jednostranný tah při přetržení vodičů. V této situaci mohou být nosné stožáry výrazně přetěžovány. Kotevní stožáry musí zajistit, aby nedošlo k pádu vodičů celé délky vedení na zem a nebyla tak ohrožena bezpečnost (viz Obr. 9 [23]). V porovnání s nosnými stožáry jsou výrazně mohutnější. Izolátorové závěsy jsou na tomto stožáru uchyceny ve směru vedení a v párech, každý závěs do jednoho směru vedení. Úsek mezi dvěma kotevními stožáry je nazýván jako „kotevní úsek“.



Obr. 9 - Funkce kotevních stožárů [23]

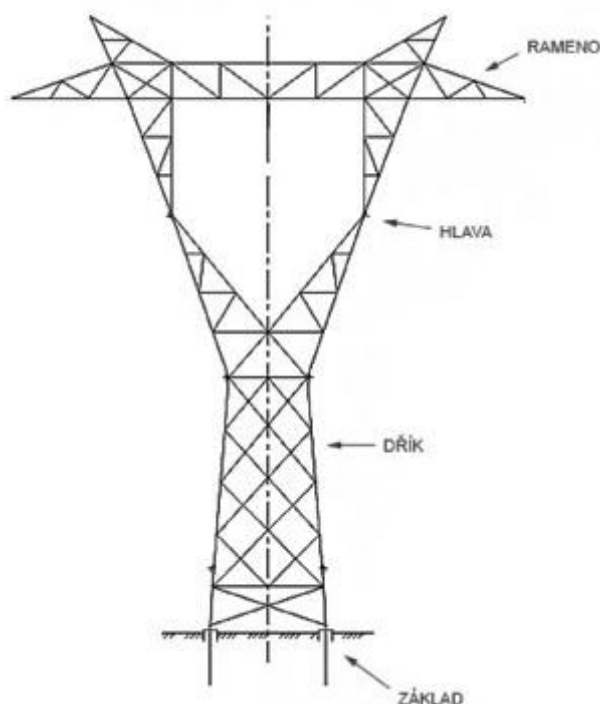
Nosný stožár má oproti kotevnímu jednodušší konstrukci. Jeho izolátorové závěsy jsou kolmo k zemi a na jejich koncích je zavěšen vodič. Oproti kotevním stožárům nesou pouze tíhu samotného vodiče a nejsou namáhány tahem do stran. Plní pouze nosnou funkci.

Dalším používaným typem jsou rohové stožáry. Ty se dimenzují jako nosné nebo také jako výztužné (tzv. rohové výztužné). To závisí na konkrétním případě využití. Využívají se tam, kde dochází k zalomení trasy vedení.

Dále také existují koncové, odbočné, rozvodné a křižovatkové (ty se využívají v situacích, kdy dochází ke křížení vedení s ostatními vedeními nebo například železnicí) [24].

4.2 Části stožárů

Kapitola části stožárů čerpá z literatury [25]. Stožár můžeme rozdělit na jednotlivé části, z nichž každá plní určitý díl celkové funkce stožáru. Základní popis části stožáru na příkladu konstrukce typu kočka lze vidět na obr. 10 [25]. Základními částmi jsou pata, dřík a hlava stožáru. Pata je spodní část stožáru, která je pevně připojena k zemi pomocí základu. Základ je nejčastěji zhotoven z betonu a pevně usazen do země. U velkých stožárů bývá hluboký i několik metrů. Jeho velká část je skryta pod zemí.



Obr. 10 - Části stožáru [25]

Na patu je napojena noha stožáru neboli dřík. Dřík je tvořen u stožárů VVN z ocelových příhrad. Dřík spojuje patu a hlavu stožáru. Na hlavě stožáru je umístěno rameno. Na rameni jsou pomocí izolátorů zavěšeny vodiče. Tato ramena mohou mít až kolem 25 metrů. Délka ramena závisí na použitém typu stožáru a napěťové hladině daného vedení.

4.3 Rozdělení stožárů

Stožáry můžeme dělit do jednotlivých skupin dle různých kritérií. V kapitole 4.1 jsme si je rozdělili do skupin podle toho jakou funkci plní. Byly to stožáry nosné, kotevní, rohové, odbočné, křížovatkové a koncové. Typ stožáru je charakterizován hlavně parametry daného vedení, jako je výkon, napětí a vodiči. Dále jej významně ovlivňuje způsob uspořádání vodičů, použití v námrazové nebo větrné oblasti nebo například konstrukce samotného stožáru. Dělení stožáru je popsáno v [24].

Hlavním hlediskem, dle kterého můžeme stožáry rozdělit do skupin, je napěťová hladina daného vedení. Rozlišujeme stožáry:

- pro 110 kV - menší, lehčí konstrukce
- pro 220 kV - využívány podobné tvary jako pro vedení 110 kV, s tím rozdílem, že jsou mohutnější, aby vydržely vyšší namáhání
- pro 400 kV - mohutné konstrukce vzhledem k velké hmotnosti samotných vodičů

Další možné kritérium dělení je podle počtu úrovní, ve kterých jsou stožáry uchyceny. Rozlišujeme:

- Vodiče jsou rozloženy v jedné úrovni. Využíváno zejména pro vedení jednoduchá. Při použití u dvojitého vedení jsou pro zachování izolačních vlastností vedení potřeba velké příčníky. Zde jsou nejčastěji využívány dvojdříkové stožáry (portál).
- Vodiče jsou rozloženy ve dvou úrovních. Nejčastěji můžeme vidět uspořádání do trojúhelníku. Uspořádání do trojúhelníku je výhodné z hlediska dobrých elektrických vlastností. Pro rozdělení do dvou úrovní se využívá např. u stožáru typu dunaj.
- Vodiče jsou rozloženy ve třech úrovních. Tento typ je často využíván pro dvojité vedení. Kdy jedna jsou jednotlivé fáze uspořádány pod sebou a jedna linka je umístěna na jedné straně a druhá na opačné straně. Toto rozložení je symetrické a může být ve tvaru stromku, opačného stromku a soudku. Typické je toto rozložení u stožárů typu soudek nebo jedle.

Stožáry můžeme rozdělit také dle konstrukčního uspořádání do dvou hlavních skupin. Toto dělení si rozebereme podrobněji v následující kapitole. Tyto skupiny jsou:

- Jednodříkové stožáry. Tento typ stožáru má pouze jednu nohu. Patří sem i konstrukce, které se ve svém vrcholu výrazně rozšíří do okna nebo velkých konzol.
- Dvoudříkové stožáry. Tento typ je často nazýván jako portálový stožár. Jsou charakteristické tím, že mají poměrně dlouhý příčník. Tento příčník je podpírán ve dvou místech.

4.4 Konstrukční řešení stožárů

V této kapitole si rozebereme možné konstrukční řešení stožárů, o kterém pojednává [26]. Literatura [26] byla použita jako zdroj pro tuto kapitolu. V tohoto rozdělení si uvedeme jednotlivé příklady typů stožáru používaných pro přenosové sítě. Příklady využívaných stožárů, jako soudek, portál, jedle nebo kočka, je možné vidět na obr. 11 [27].

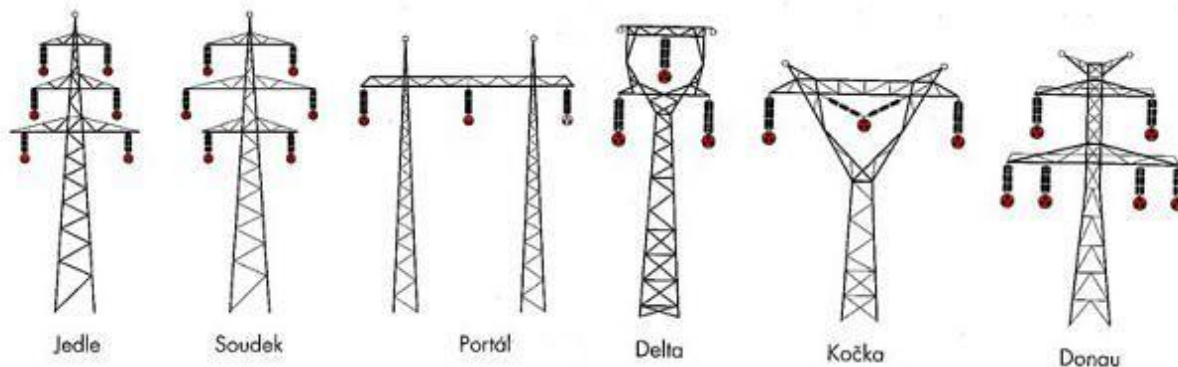
4.4.1 Jednodříkové stožáry

Jednodříkové stožáry, neboli stožáry s „jednou nohou“, které mají kruhový stálý, odstupňovaný nebo postupně zužující průřez jsou využívány zejména v distribučních sítích. Tyto stožáry jsou charakteristické svou malou výškou. Jsou velmi omezené svou schopností unést hmotnost vodiče.

Nejčastěji je však u tohoto typu stožáru využívána příhradová konstrukce do čtyřúhelníku. Ve většině případů se setkáváme s konstrukcí nohy, která se od základu směrem k hlavě zužuje. Například u nosných stožárů se jedná o 4 až 5 cm zúžení na 1 m výšky stožáru. Šířka hlavy může být až 60 cm pro stožáry vedení na hladině 400 kV. U vyšších stožárů je většinou dřík realizován většinou zalomením sklonu a u základu je často využíváno rozkročení nárožníků (část paty stožáru, která je spojena se základem) do samostatných základů. Tím se zajistí menší namáhání samotných základů.

Pro konstrukci těchto typů stožárů se používají většinou 5 až 8 m dlouhé montážní dílce. Délka dílců je výrazně závislá na výšce a oblasti využití stožáru. Spojy bývají šroubované nebo jsou jednoduše přivařeny. U mohutných stožárů, které jsou namáhány větší smykovou silou, je využívána mřížová výplň nebo zkřížené diagonály.

Velice podobné typy stožárů jsou tzv. jedle a soudek. Oba jsou tvořeny čtyřbokou příhradovou konstrukcí a mají tři ramena. Liší se ve způsobu řazení délky těchto ramen. Zatímco u jedle se od špičky stožáru ramena postupně zvětšují a jejich tvar tak výrazně připomíná jedli, tak u typu soudek je nejdelší rameno umístěno uprostřed. Zbývají dvě ramena jsou stejně dlouhá, ale kratší než to prostřední. Tvoří tak tvar připomínající sud. Tyto dva typy stožárů jsou často využívány v případech, kdy je vedení dvojité nebo dokonce trojitě.



Obr. 11 - Typy stožárů [27]

Pro vedení 400 kV je velice často použit stožár typu dunaj. Tento typ je velmi mohutný. Ve vrchní části jsou umístěny dva růžky pro umístění zemnicích lan. Pod špičkou jsou dvě mohutná ramena pro uchycení fázových vodičů. Tento typ stožáru je vhodný pro umístění dvojnásobného vedení.

Zvláštní skupinu, která je vhodná výhradně pro jednoduché vedení, tvoří stožáry s „oknem“ uprostřed. Tímto oknem uprostřed je vedena jedna fáze vedení. Je tomu tak u stožárů typu kočka a delta. Takzvaná kočka je charakteristická svým tvarem připomínajícím velké tiskací písmeno Y se spojením vrchních konců. Jednotlivé vodiče jsou uchyceny ve stejné výšce. Na vrchu stožáru jsou opět umístěny dva růžky pro umístění zemnicích lan. Typ delta má hlavu ve tvaru čtyřúhelníku. Spodní strana tohoto čtyřúhelníku je protažená do stran pro uchycení dvou fází vedení. Třetí fáze je naopak umístěna uprostřed vrchní strany. Samotné vodiče jsou tak uspořádány do trojúhelníku. Na horní straně hlavy stožáru jsou umístěny také dva růžky pro umístění zemnicích lan.

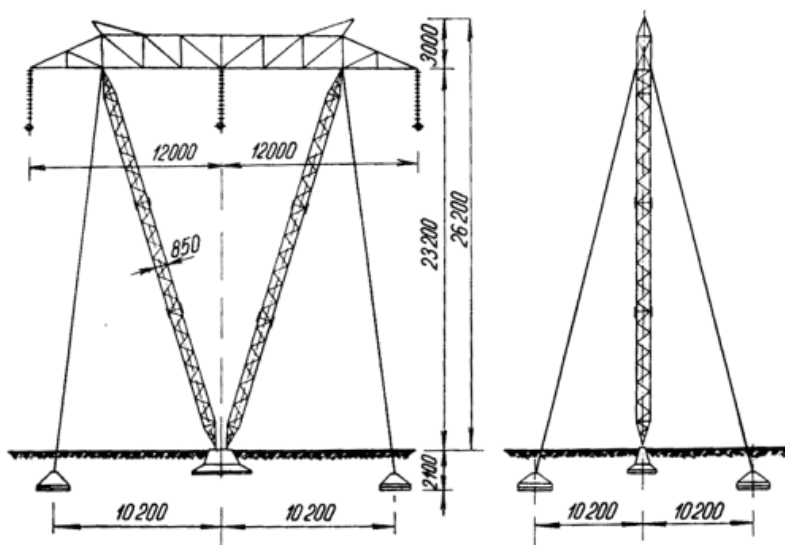
4.4.2 Dvoudříkové stožáry

Nejčastěji se pro konstrukci dvoudříkových stožárů, tedy portálů, využívá dlouhé rameno podepřené dvěma dříky. Tyto dříky mohou mít konstantní, postupně zužující nebo zalomený průřez. Tvarování příčnicku (ramena) může být mnohem rozmanitější a odvíjí se od oblasti využití. Samotné nohy jsou postupně zužovány a protaženy i nad příčník, kde jsou vytvarovány do špičky pro uchycení zemnicích lan. O konstrukci samotného stožáru platí to, co bylo uvedeno v předešlé kapitole pro jednoduché stožáry. Portálové stožáry se nejčastěji vyskytují na napěťové hladině 220 kV. Nosný portálový stožár bývá vyšší než kotevní stejného typu. Je to protože u nosného je potřeba na rameno vodič uchytnout pomocí izolátorových závěsů, které mívají velkou délku. U kotevních stožárů tenhle problém odpadá a vodič je možné umístit jiným způsobem. Existuje také dvojitý portál, který nese dvě linky vedení. V takovém případě je vzdálenost mezi nohama větší a jsou zde umístěny závěsy se čtyřmi vodiči.

4.4.3 Kotvené stožáry

Konstrukčně i staticky velmi podobné jako portálové stožáry jsou kotvené stožáry. Jsou to prostorové konstrukce vytvořené z dlouhých prutů a kotevních lan. Jsou dvě základní varianty, jak mohou být postaveny. První připomíná stožár portálového typu. Rozdíl je v tom, že se nohy s přibližující vzdáleností k zemi od sebe lehce vzdalují. Horní příčník je pak z každé strany přichycen dvěma ocelovými lany, která jsou ukotvena ve stejném místě. Druhá varianta je ve tvaru písmene V, která je zobrazena na obr. 12 [26]. Horní příčník spojuje vzdálené konce a nohy stožáru jsou uchyceny v jednom základu. Ocelová lana jsou přichycena k příčníku obdobně jako u první varianty. Rozdíl je v tom, že tentokrát nejsou uchycena ve stejném místě, ale vedou do stran, a čím blíže jsou zemi, tak se jejich vzájemná vzdálenost zvětšuje.

Stabilitu stožáru zajišťují kromě dříků umístěných pomocí základů do země také 4 ocelová lana. Tato lana jsou uchycena do půdy zemními kotvami. Tímto konstrukčním řešením můžeme dosáhnout významné úspory materiálu (20 až 30 %), přitom neklesá stabilita samotného stožáru. Nevýhodou u tohoto typu provedení je náročnější údržba, samotná montáž ale také především větší zastavěné území. I přes tyto nevýhody mají kotvené stožáry velké uplatnění. Využívají se ve svahovém terénu nebo v oblastech s nevyužitou půdou.



Obr. 12 - Kotvený stožár (typ V)[26]

4.5 Bezpečná vzdálenost vedení od okolí

Rozdělení stožárů a určení jejich typů se provádí v profilu vedení. V tomto profilu se vyznačí důležitá místa jako například křížení jednotlivých vedení nebo křížení s pozemní komunikací. V těchto místech se obzvláště dbá na to, aby vodič nenarušil bezpečnou ochrannou vzdálenost křížovaných objektů ani při největším průhybu. Venkovní vedení musí být schopné vydržet své jmenovité napětí, ale také dočasné přepětí a atmosférické impulzy.

V normě ČSN EN 50341 je definována elektrická vzdálenost D_{el} (m). Je to nejkratší možná vzdálenost, která je vyžadována na zabránění výboje mezi fázovými vodiči a objekty na potenciálu země. Jmenovité hodnoty D_{el} jsou definovány v tab. 2 [17].

Tab. 2 - Elektrická vzdálenost [17]

Jmenovité napětí sítě (kV)	Nejvyšší napětí sítě (kV)	D_{el} (m)
110	123	1,0
220	245	1,7
400	420	2,8
700	765	4,9

Pro názornost této problematiky jsem se rozhodl ukázat příklady bezpečné vzdálenosti pro konkrétní situace, které udává norma PNE 33 3300 [28].

- Nejkratší možná vzdálenost od země ve volné krajině (rovinatý profil) - $5 \text{ m} + D_{el}$
- Nejkratší vzdálenost od stromů pod vedením (na které není možné vylézt) - D_{el}
- Nejkratší vzdálenost od stromů vedle vedení (na které není možné vylézt) - D_{el}
- Nejkratší vzdálenost nad budovami se střechou odolnou proti požáru a sklonem menším než 15° vzhledem k vodorovné rovině - $5 \text{ m} + D_{el}$
- Nejkratší vzdálenost od povrchu pozemní komunikace nebo hlavy kolejnice - $6 \text{ m} + D_{el}$
- Nejkratší vzdálenost od dohodnuté ložné míry vodních cest - $2 \text{ m} + D_{el}$

V okolí elektrických vedení vysokého a velmi vysokého vedení je zákonem definováno ochranné pásmo. V tomto pásmu je bez souhlasu vlastníka zakázáno vystavovat jakékoliv stavby nebo konstrukce. Ochranné pásmo venkovního vedení je vymezeno kolmými vzdálenostmi na směr trasy vedení na obě strany od krajních vodičů a je [25]:

- vedení o napětí 110 kV - 12 m
- vedení o napětí 220 kV - 15 m
- vedení o napětí 400 kV - 20 m

Ve zvláštních případech, jako jsou například linky s mimořádnou provozní spolehlivostí, je nutné zajistit vyčištění okolí od stromů, které by se mohli při pádu dotknout vedení.

Nejdůležitější podmínkou provozu elektrického je, aby neohrožovalo zdraví osob. Osoby mohou být provozem elektrického vedení vystaveny jak nepřímým, tak přímým vlivům. Nejvíce je člověk ovlivňován přítomností elektromagnetického pole, které je vyvoláno provozem vedení. Přípustné hygienické limity pro elektromagnetická zařízení s frekvencí od 0 do $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz upravuje Nařízení vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. V tomto nařízení vlády je stanovena nejvyšší přípustná hodnota indukované proudové hustoty J v centrálním nervovém systému člověka jako $J = 0,002 \text{ A/m}^2$.

Pro osoby, které se vyskytují v těsné blízkosti vedení, jsou zdravotní rizika velmi nízká. Na základě výpočtů vycházejících z Nařízení vlády č. 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením bylo zjištěno, že pro dodržení hygienických limitů je nutné pro vedení 400 kV dodržet minimální vzdálenost 11,85 m od země. Tato vzdálenost se v praxi zaokrouhluje na hodnotu 12 m. Takže při výstavbě vedení 400 kV je povinen zřizovatel dodržet vzdálenost vedením 12 m od země či okolních objektů. Splněním těchto hygienických limitů jsou v naprosté většině případů zajištěny také minimální bezpečné vzdálenosti od země a okolních objektů dané normou.

5 Klimatické podmínky ovlivňující vlastnosti vodiče

Vlastnosti samotného vodiče jsou výrazně ovlivněny jeho okolím. Jinak se vodič chová ve vysokých teplotách nebo naopak při mrazech. To je způsobeno teplotní roztažností látek. Čím více se zvětšuje teplota, tak těleso zvětšuje svůj objem. Mohlo by tak dojít k ohrožení okolí vedením, které překročí minimální bezpečnou vzdálenost od okolních objektů. Při mrazech může vodič naopak zkrátit svou délku natolik, že by to mohlo vést až ke zhroucení stožárů. Těmto jevům se snažíme zabránit dobrým návrhem vedení. Předem musíme počítat s atmosférickými podmínkami, které nám tento návrh ztíží. Jaké jevy to vlastně jsou a jak moc ovlivňují samotné vlastnosti vodiče? To se pokusíme rozebrat v následující kapitole, která čerpá z literatury [22].

5.1 Povětrnostní vlivy

Na venkovní vedení působí povětrnostní vlivy, jako jsou vítr, vichřice, bouřky, změny teplot, námraza, nadmořská výška a podobně. V každém státě je různé klima, a tak se vlivy ovlivňující vodiče výrazně liší tím, kde se vedení nachází. Od toho se odvíjí také odlišné předpisy v jednotlivých zemích. Vliv klimatických podmínek na provoz vedení se posuzuje na základě dlouhodobých provozních sledování na již stojících vedeních.

Ani při jedné z klimatických podmínek nesmí být překročeno maximální povolené mechanické napětí ve vodiči. Podmínky, které musíme při návrhu venkovního silového vedení uvažovat, jsou:

- maximální a minimální teplota - kontrola minimálních vzdáleností vodiče nad terénem, silnicemi nebo křižovaným či souběžným vedením
- vítr - kontrola minimální vzájemné vzdálenosti vodičů a vzdáleností vodiče od konstrukce (stožár)
- námraza - kontrola minimálních vzdáleností vodiče nad terénem, silnicemi nebo křižovaným či souběžným vedením
- současné působení více jevů najednou (nejčastěji kombinované zatížení větrem a námrazou)

Nejvyšší návrhová teplota musí být také součástí projektové dokumentace pro kontrolu nejmenších vzdáleností od okolních objektů. Ve všech situacích se teplotou vždy rozumí teplota vodiče. Při určování nejvyšší návrhové teploty se uvažují následující podmínky:

- proud odpovídající nejvyššímu zatížení v letním období
- teplota okolí 35 °C
- rychlost větru 0,5 m/s pod úhlem 45° na osu vodiče
- intenzita slunečního záření 1000 W/m²
- koeficient absorpce a koeficient emisivity 0,5

5.2 Teplota

Teplota je jedním z nejdůležitějších činitelů při návrhu vedení. Vlivem teploty se mění jak délka samotného vodiče, tak i jeho namáhání, což ovlivňuje zatížení stožárů. Při vyšších teplotách se také zmenšuje pevnost materiálu. Při návrhu je velice důležité určit co nejpresněji nejvyšší a nejnižší možnou teplotu vodiče. Teplota vodiče je závislá na mnoha faktorech, počínaje intenzitou slunečního záření, přes proudění vzduchu a proudovým zatížením vodiče konče. Pokud uvažujeme úroveň spolehlivosti prvního stupně, tak se u nás uvažují teploty v rozmezí od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ je přitom určená jako referenční.

Maximální teplota vodiče je důležitá pro výpočet maximálního průhybu vedení a následného ověření bezpečné vzdálenosti od terénu. Naopak při nízkých teplotách se průhyb vedení zmenšuje, ale tato situace má zase jiná úskalí. Při zkrácení vodiče se výrazně zvětší síly, které působí na izolátory. Což může vést až k jejich poškození a ohrožení bezpečnosti okolí.

5.3 Námraza

Na zavěšený vodič působí mnohé přídavné zatížení, které rozhodně nemůžeme zanedbat. Je to například vítr nebo námraza. Námraza je atmosférický jev, který vzniká výhradně při teplotách v rozmezí 0 až $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vysoké vlhkosti vzduchu. Projevuje se vznikem ledových krystalků na povrchu objektů a pro vedení má nezanedbatelnou přídavnou hmotnost. Vzniká zmrznutím malých kapek vzdušné vlhkosti při kontaktu s cizími objekty ve výše zmíněném teplotním rozmezí. Je to podobný princip vzniku, jako je u mlhy.

Vznik námrazy v našich zeměpisných šířkách je velice častý a hodně ovlivňuje nejen výběr trasy vedení, ale má také výrazný vliv na spolehlivost daného vedení. Ze zpětných rozborů již zrealizovaných vedení vyplývá, že námraza má 30 - 40 % podíl na tvorbě poruch a výpadků dodávek [22]. A to i přes to, že možnost výskytu námrazy je pouze přibližně ve 2 měsících za rok. Proto se věnuje velká pozornost omezení její nepříznivých vlivů. Poškozování stožárů nebo dokonce až jejich destrukce nemá tak výrazný podíl na poruchách, jako výpadky vedení v důsledku mezifázových zkratů, které způsobují velké kusy námrazy odpadávající z vedení. Vzhledem k tomuto faktu roste důležitost na upozornění již malého množství námrazy, aby se předcházelo vytvoření větší vrstvy a následným mezifázovým zkratům při jejich odstraňování.

Námraza představuje velké zatížení vedení venkovních vodičů. Liší se od země, kde je vedení postaveno. V některých zemích a extrémních podmínkách se může jednat až o více než 18 kg na jeden metr délky vodiče. To může vést dokonce k tomu, že bezpečnostní opatření na tomto úseku si vyžádá až dvojnásobné prodražení celé stavby. Aby takové vedení odolalo těmto extrémním podmínkám, je nutné ho námrazy zbavovat. To se dělá sklepáváním nebo vyhříváním vedení. Území ČR je rozděleno do osmi námrazových oblastí I-0 až I-K. Velikost námrazy se pak určí dle toho, v jaké oblasti se nachází z tab. 3 [28].

Velikost námrazy je u nás definována v normě ČSN 50341-3 nebo vnitřní podnikové normě energetiky pro rozvod elektrické energie PNE 33 3300. Zde je určena hustota námrazy ve formě jinovatky jako $\rho_i = 500 \text{ kg/m}^3$. V zmíněných normách je také uveden postup pro výpočet velikosti vzniknuté námrazy.

Nejdříve ze všeho se určí takzvané extrémní referenční zatížení námrazou na vodičích I_{R50} . To je definováno jako zatížení námrazou na jednotku délky vodiče v N/m ve výšce $h = 10 \text{ m}$ nad zemí a navrhovanou životností $T = 50 \text{ let}$. Navrhovaná životnost je doba, po kterou je předpokládáno, že vedení bude plně využíváno v provozu. Skutečná doba využívání se pohybuje v rozmezí 30 až 80 let.

Tab. 3 udává výpočet extrémního referenčního zatížení námrazou. Je odvozené ze statisticky naměřených hmotností námrazy na měrné tyči o průměru 30 mm m_r (kg/m). Hmotnost námrazy na vodiči o průměru 30 mm v dané námrazové oblasti je charakterizována číslem za velkým písmenem I. Tedy pro I-1 platí, že na vodiči je námraza o hmotnosti maximálně 1 kg/m, v oblasti I-2 do 2 kg/m, obdobně pro I-3 a další. Výjimku představuje oblast I-0, kde uvažujeme námrazu s hmotností do 0,5 kg/m a I-K, kde platí, že námraza má více než 18 kg/m.

Tab. 3 - Extrémní referenční zatížení námrazou [28]

Námrazová oblast	Hmotnost námrazy na tyči o průměru 30 mm m_r (kg/m)	Referenční zatížení námrazou I_R (N/m) na jednotku délky vodiče o průměru d (mm)	
		$d \leq 30$ mm	$d > 30$ mm
I-0	0,5	$1,064 + 0,1280 d$	$3,963 + 0,0314 d$
I-1	1	$3,175 + 0,2212 d$	$8,515 + 0,0432 d$
I-2	2	$8,661 + 0,3653 d$	$17,53 + 0,070 d$
I-3	3	$15,00 + 0,481 d$	$25,46 + 0,132 d$
I-5	5	$29,00 + 0,668 d$	$43,84 + 0,174 d$
I-8	8	$51,70 + 0,893 d$	$73,89 + 0,153 d$
I-12	12	$83,66 + 1,135 d$	$107,80 + 0,330 d$
I-18	18	$133,53 + 1,435 d$	176,58
I-K	>18	Stanoví se individuálně dle případu	
Pozn.: V námrazové oblasti N0 se pro účely návrhu uvažuje zatížení námrazou jako v námrazové oblasti N1			

Jednotlivé námrazové oblasti jsou dle staré normy označovány velkým tiskacím písmenem N a čísla (např. N2). Mapa námrazových oblastí České republiky je uvedena v příloze A.

Z uvedených informací lze vyčíst, že námraza má na provoz vedení výrazný vliv. Je proto vhodné pokusit se vyhnout oblastem s častým výskytem námrazy při návrhu trasy vedení. Náklady na vybudování větší délky vedení jsou mnohdy menší než náklady pro zabezpečení vedení před vlivem námrazy.

Pokud není v projektové dokumentaci řečeno jinak, tak se počítá pouze se zatížením vodičů a neuvažuje se zatížení podpěrných bodů. Se zatížením na izolátorových závěsech se počítá pouze v případě svislého zatížení. Na výstražných zařízeních (koule pro lepší viditelnost) se uvažuje námraza stejná jako na vodičích [22].

5.3.1 Výpočet návrhového zatížení námrazou

Pro výpočet návrhového zatížení námrazou je klíčové stanovit charakteristické zatížení námrazou I_d (N/m). Charakteristické zatížení námrazou není závislé jen na námrazové oblasti, ve které se nachází, ale také na výšce vodiče nad zemí. Pro výpočet se standardně uvažuje výška 10 m nad zemí.

Extrémní zatížení námrazou na jednotku délky vodiče I_{R50} (N/m) ve výšce h nad zemí se určí ze vztahu [28]

$$I_{R50} = K_{lc} \cdot K_h \cdot I_R, \quad (5.1)$$

kde I_{R50} je extrémní zatížení námrazou podle tab. 3 (N/m)

K_{lc} je součinitel místních podmínek pro zatížení námrazou (-)

K_h je součinitel výšky pro zatížení námrazou (-)

Hodnota součinitele místních podmínek pro zatížení námrazou je většinou $K_{lc} = 1$. V přenosové síti může být pro omezenou oblast uvedena hodnota tohoto součinitele různá od jedné a bude vyjadřovat odchylku od extrémního referenčního zatížení námrazou v daném místě, která je založena na dlouhodobých zkušenostech provozovatele přenosové nebo distribuční soustavy.

Koeficient výšky pro námrazové oblasti I-0 až I-3 určíme ze vztahu

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,13}. \quad (5.2)$$

Koeficient výšky pro námrazové oblasti I-5 až I-18 určíme ze vztahu

$$K_h = \left(\frac{h}{10}\right)^{0,25}, \quad (5.3)$$

kde h je výška vodiče nad zemí, kdy se uvažuje průhyb při teplotě -5°C bez námrazy (m)

Po určení charakteristického zatížení námrazou stanovujeme návrhové zatížení námrazou na jednotku délky vodiče I_d (N/m) opět ve výšce h nad zemí. Toto návrhové zatížení stanovíme ze vztahu

$$I_d = \gamma_I \cdot I_{R50}. \quad (5.4)$$

V tomto vztahu vystupuje γ_I (-), což je takzvaný dílčí pravděpodobnostní koeficient zatížení námrazou.

5.3.2 Dílčí koeficienty zatížení při mezních stavech únosnosti

Hodnoty dílčích koeficientů zatížení námrazou γ_I , zatížení větrem γ_W , současného působení větru i námrazy ψ_{wc} a zatížení tíhou γ_G , které se používají na posouzení v mezních stavech únosnosti pro navrhovanou životnost 50 let a uvažovanou úroveň spolehlivost provozu jsou v tab. 4 [11].

Následné základní návrhové hodnoty zatížení se poté určí jako součin těchto koeficientů pravděpodobnosti γ a charakteristického zatížení. Výsledek tohoto součinu se následně srovnává s hraniční hodnotnou určující pevnost vodiče. V zásadě jsme omezeni dvěma mezními stavy, a to mezním stavem únosnosti a mezním stavem použitelnosti.

Mezní stav únosnosti je dán předpokladem, že tah vodiče v jakémkoliv místě rozpětí při všech návrhových zatíženích, která odpovídají zatěžovacím stavům, nesmí překročit 65 % matematické pevnosti vodiče vyrobeného z materiálu na bázi hliníku a 68 % matematické pevnosti vodiče vyrobeného z materiálu na bázi oceli.

Mezní stav použitelnosti je dán předpokladem, že tah vodiče v jakémkoliv místě rozpětí při všech návrhových zatíženích, která odpovídají zatěžovacím stavům korespondujícím úroveň spolehlivosti 1 dle tabulky, nesmí překročit 55 % matematické pevnosti vodiče vyrobeného z materiálu na bázi hliníku a 58 % matematické pevnosti vodiče vyrobeného z materiálu na bázi oceli.

Úroveň spolehlivosti charakterizuje, jakou důležitost má dané vedení. Tím se rozumí, jak moc je případnou poruchou dodávky elektrické energie ohrožena bezpečnost uživatelů. Požadovaná úroveň je určena s ohledem na důsledky případné poruchy na:

- zásobování elektřinou (např. důležití odběratelé, vícenásobná vedení)
- bezpečnost obyvatelstva (např. příměstské, městské a hustě osídlené oblasti)
- ostatní infrastrukturu (např. železnice, dálnice a jiná vedení)

Úroveň spolehlivosti 1 je dána jako referenční. Není-li v technické dokumentaci uvedeno jinak, použije se pro návrh úroveň spolehlivosti 1.

Tab. 4 - Extrémní referenční zatížení námrazou [15]

Zatěžovací stav	Tíha	Úroveň spolehlivosti					
		1		2		3	
	γ_G	γ_W	γ_I	γ_W	γ_I	γ_W	γ_I
Extrémní vítr (-5 °C)	1,00	1,00		1,20		1,40	
Minimální teplota	1,20	- 30 °C		- 35 °C		- 40 °C	
Rovnoměrné zatížení námrazou (-5 °C)	1,00		1,00		1,25		1,50
Kombinované zatížení větrem a námrazou (-5 °C)	1,00	1,00		1,00		1,00	
		$\psi_{wc} = 0,25$		$\psi_{wc} = 0,25$		$\psi_{wc} = 0,25$	

5.3.3 Ekvivalentní průřez vodiče s námrazou

Průměr vodiče s námrazou stanovíme dle vzorce [28]

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4 \cdot I_d}{g \cdot \pi \cdot \rho_1}} , \quad (5.5)$$

kde D je průměr vodiče s námrazou (m)
 d je průměr vodiče bez námrazy (m)
 I_d je návrhové zatížení vodiče námrazou (N/m)
 g je tíhové zrychlení ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
 ρ_1 je hustota námrazy ($\rho_1 = 500 \text{ kg/m}^3$)

Při výpočtech mechaniky daného vodiče je také nutné definovat další veličinu. Namísto toho abychom počítali s tíhou jednoho vodiče, tak definujeme takzvané poměrné zatížení vodiče z (-). Nejde o nic jiného než poměr tíhy přetíženého vodiče k tíze čistého vodiče bez námrazy. Je definován jako

$$z = \frac{q_1 + q_2}{q_1} , \quad (5.6)$$

kde q_1 je zatížení vodiče bez námrazy (N/m)
 q_2 je zatížení vodiče námrazou (identické jako char. zatížení námrazou I_d) (N/m)

a zatížení vodiče bez námrazy vypočítáme ze vztahu

$$q_1 = g_1 \cdot g , \quad (5.7)$$

kde g_1 je jmenovitá měrná hmotnost vodiče (tabulková hodnota) (kg/m)
 g je tíhové zrychlení ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

5.3.4 Odstranění námrazy z vedení

Způsoby odstraňování námrazy z vedení jsou uvedeny v [22]. Z výše uvedených informací vyplývá, že námraza způsobuje mechanické namáhání vodičů venkovního silového vedení. Následkem výskytu námrazy na vodičích může být přetržení samotného vodiče nebo ohnutí až zlomení stožárů. Kvůli těmto příčinám je nutné námrazu co nejdříve z vedení odstranit. V zásadě existují dva způsoby jak to udělat, a to mechanicky a elektricky.

Mechanický způsob spočívá v prostém sklepávání námrazy dlouhou izolační tyčí. Tahle metoda je vzhledem ke svému principu značně fyzicky a časově náročná. Její velkou nevýhodou je možné poškození vodiče. Naopak plus má tato metoda ve své jednoduchosti. V současnosti je tato metoda využívána pouze v rozvodnách, kde je vytvořena námraza na krátkém úseku vedení.

Druhý způsob, mnohem elegantnější způsob, je odstranění námrazy procházejícím elektrickým proudem, tedy takzvaným vyhříváním vedení. Odstranění námrazy vyhříváním plyne z rovnice tepelné bilance. Průchodem elektrického proudu vodičem se uvolňuje velké množství tepla. Toto teplo je z vodiče uvolňováno do svého okolí a má za následek postupné roztávání námrazy nad průměrem vodiče. Voda vzniklá z rozmrznutí části námrazy stéká dolů

pod vodič a znovu zamrzá. V oblasti nad vodičem se postupně vrstva námrazy ztenčuje. Takto vzniknutý můstek nakonec nevydrží tah obalu a námrazový válec padá na zem. Bylo zjištěno, že k odpadnutí námrazy je nutné odtavit v průměru zhruba 80 % tloušťky námrazy nad vodičem.

Vodiče se mohou takto vyhřívat při přerušené dodávce nebo i za provozu. Při přerušeném provozu vedení se zkratované vedení napájí střídavým nebo stejnosměrným proudem ze samostatného zdroje. Při nepřerušení dodávky se vyhřívání vedení dělá tak, že se vhodným řazením sítě dosáhne takového zatížení, které postačí na odpadnutí námrazy. Aby námraza z vedení skutečně odpadla, tak je třeba dosáhnout minimálně teploty o 40 °C vyšší, než je teplota okolí. Se stoupajícím proudem, a tím i rostoucí teplotou, se doba, po kterou je vedení nutné vyhřívat, zkracuje. Teplota však nesmí překročit hranici 130 °C. To by mohlo ohrozit pevnost vodičů.

Co nejrychlejší odstranění námrazy z vodičů znamená menší náklady a námahu, oproti tomu, když necháme námrazu vytvořit na vodiči pořádně silnou vrstvu. Odstranění takovéto vrstvy může znamenat i nucené odstavení daného vedení. Proto je klíčové sledovat nárůst námrazy a odhadnout moment, kdy její odstranění nebude znamenat přerušení dodávky elektrické energie. K tomu slouží takzvané provozní meteorologické stanice, které sledují aktuální klimatické podmínky v blízkosti a mohou operátory upozornit na možný výskyt námrazy. Možné je také při očekávaném vzniku námrazy jejímu vzniku předejít takzvaným předeříváním vodiče. Vodič, na kterém dosud není námraza, se zahřeje teplotu, která vznik námrazy vůbec neumožní.

5.4 Vítr

Dalším klimatickým jevem, který výrazně ovlivňuje vlastnosti vedení, je vítr. Vítr je horizontální proudění vzduchu v atmosféře. Příčinou vzniku větru jsou rozdílné tlaky v různých vrstvách atmosféry a také rotace Země. Vítr je charakterizován svým směrem a rychlostí. Vzduch se pohybuje směrem do oblasti vyšší teploty a nižšího tlaku vzduchu. Mimo této základní podmínky je směr větru také výrazně ovlivňován reliéfem krajiny. Jeho rychlost se pak odvíjí od rozdílů tlaků vzduchu. Zde platí jednoduché pravidlo, čím větší rozdíly, tím je vyšší rychlost větru. Větry, které jsou nejčastější v daném směru, jsou nazývány převládající.

Pohyb vzduchu je dán také několika základními podmínkami. První významnou podmínkou je meteorologická situace panující v dané oblasti. Tato situace je charakterizována tlakovými nížemi a výšemi. Druhou podmínkou je sluneční záření. Lepší prohřátí (zvýšení teploty) určité oblasti může způsobit výrazné pohyby vzduchu ve vertikálním směru. Třetí a poslední podmínka je výskyt překážek. Míra ovlivnění závisí na velikosti překážky. Překážka způsobí obtékání vzduchu, kde dochází ke stlačení vzduchové vrstvy a tím dojde k zesílení rychlosti větru a následnému možnému výskytu vzdušných vírů za těmito překážkami. Kvůli výskytu

překážek se rychlost větru může velice rychle měnit. Tyto náhlé změny rychlosti se projevují jako poryvy a jsou vnímány jako nárazy větru.

5.4.1 Kategorie terénu a rychlost větru

Vítr způsobuje pro vedení dodatečné zatížení vodičů i jiných jeho částí. Působením větru může dojít dokonce k rozkmitání vodičů, které mohou mít za následek zkraty mezi fázemi. Podobně jako u námrazy, kde je naše území rozděleno do několika námrazových oblastí, tak pro vítr platí totéž. Dle Národního aplikačního dokumentu k ENV 1991-1-4 je území ČR rozděleno do pěti oblastí, pro něž jsou definovány rozdílné základní rychlosti větru $v_{b,0}$, které jsou uvedeny v tab. 5 [28]. Tyto oblasti jsou znázorněny na mapě větrných oblastí ČR, která je k práci přiložena v příloze B.

Tab. 5 - Větrné oblasti [28]

Větrná oblast	I	II	III	IV	V
Základní rychlost větru $V_{b,0}$ (m/s)	22,5	25	27,5	30	36

Velikost rychlosti větru v_h (m/s) určíme dle

$$v_h = k_T \cdot \ln \frac{h}{z_0} \cdot v_{b,0} , \quad (5.8)$$

kde k_T je součinitel terénu (-)
 z_0 je třecí výška (m)

Někdy je také definována charakteristická hodnota pro maximální rychlost turbulentního větru, která vychází z jeho střední rychlosti větru v intervalu 2 s, a nazývá se nárazová rychlost větru v_g (m/s). Turbulencemi rozumíme odchylky okamžité rychlosti od střední hodnoty rychlosti větru. Tyto odchylky jsou závislé především na okolním terénu. Vztah mezi nárazovou a střední rychlostí větru se odvíjí od velikosti nárazového koeficientu G_q a je dán rovnicí

$$v_g = G_q \cdot v_{mean} . \quad (5.9)$$

Nárazový koeficient rychlosti větru je možné pro integrační intervaly měření rychlosti větru vypočítat dle následujícího vztahu

$$G_q = \left(1 + \frac{2,28}{\ln \frac{h}{z_0}} \right)^2 . \quad (5.10)$$

Na vlastnosti větru působí členitost terénu ve kterém se vedení nachází. Terén je v ČR dle ENV 1991-2-4 rozdělen do pěti kategorií. O čemž vypovídá následující tabulka [15]:

Tab. 6 - Kategorie terénu [15]

Kategorie terénu	Charakteristika terénu	k_T	z_0
I	Bouřlivé otevřené moře, jezera do vzdálenosti nejméně 5 km proti směru větru a rovná plochá krajina bez	0,17	0,01
II	Zemědělská půda s hraničními živými ploty, rozptýlené malé zemědělské usedlosti, domy a stromy	0,19	0,05
III	Předměstské nebo průmyslové oblasti a trvale zalesněná území	0,22	0,3
IV	Městské oblasti ve kterých je alespoň 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami s průměrnou výškou > 15 m	0,24	1
V	Hornatý a více členitý terén, kde se vítr může místně zesilovat nebo zeslabovat	hodnotí se individuálně	

5.4.2 Zatížení větrem

Pro určení zatížení vedení větrem je důležité stanovit dynamický tlak větru. Obecně se dynamický tlak na libovolný prvek vedení bez námrazy q_h (N/m²) ve výšce h nad zemí stanoví dle vztahu

$$q_h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_h^2, \quad (5.11)$$

kde ρ je hustota vzduchu, $\rho = 1,25$ kg/m³ nezávisle na teplotě nebo nadmořské výšce
 v_h je rychlost větru ve výšce h nad zemí (m/s)

Jak již bylo výše zmíněno, tak vítr způsobuje přídatné zatížení na jednotlivé části vedení. Při výpočtu tohoto zatížení musíme nejprve stanovit velikost síly, která působí na tyto části vedení. Síla větru Q_{WX} (N) způsobená působením větru v kolmém směru na libovolný prvek vedení je dána vztahem

$$Q_{WX} = q_h \cdot G_q \cdot G_{DX} \cdot C_X \cdot A, \quad (5.12)$$

kde q_h je dynamický tlak větru (N/m²)

G_q je nárazový koeficient větru (-)

G_{DX} je dynamický koeficient daného konstrukčního prvku (-)

C_X je aerodynamický součinitel, závisující na tvaru konstrukčního prvku (-)

A je průmět plochy daného prvku do roviny kolmé na směr působení větru (m²)

Nárazový koeficient je stejný pro všechny prvky vedení stejný. Pokud se uvažuje přímo nárazová rychlost větru, tak je jeho hodnota rovna 1. Pokud se jedná o střední rychlost větru, určujeme jej dle vztahu

$$G_q = \left(1 + \frac{2,28}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \right)^2. \quad (5.13)$$

Dále si definujeme síly a případně zatížení pro různé konstrukční části vedení, která jsou popsána v literatuře [22].

Zatížení vodiče větrem

Síla působící na vodič je důležitá pro určení mechaniky celého vodiče. Tato síla způsobí namáhání v příčném směru a současně tak zvyšuje tah ve vodiči. Síla větru, která působí na jeden metr vodiče v daném rozpětí je dána jednotkovým zatížením vodiče větrem q_{wc} (N/m), které se spočítá dle vztahu

$$q_{wc} = q_h \cdot G_q \cdot G_{DC} \cdot C_c \cdot d \cdot \cos^2 \phi, \quad (5.14)$$

kde d je průměr vodiče (m)

ϕ je úhel náběhu mezi uvažovaným směrem větru a směrem rozpětí (°)

Dynamický koeficient rozpětí vodiče G_{DC} (-) určíme s pomocí tab. 7 [15]. Tento koeficient zohledňuje fakt, že tlak větru na vodič nedosahuje svého maxima v celé délce rozpětí.

Tab. 7 - Dynamický koeficient rozpětí [15]

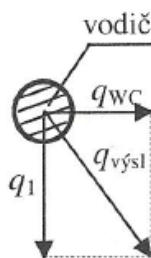
Kategorie terénu	Vzorec	Větrné rozpětí (m)					
		100	200	300	400	600	800
I	$1,3 - 0,073 \cdot \ln(a)$	0,96	0,91	0,88	0,86	0,83	0,81
II	$1,3 - 0,082 \cdot \ln(a)$	0,92	0,87	0,83	0,81	0,78	0,75
III	$1,3 - 0,098 \cdot \ln(a)$	0,88	0,78	0,74	0,71	0,67	0,65
IV	$1,3 - 0,110 \cdot \ln(a)$	0,79	0,72	0,67	0,64	0,6	0,57

Koeficient aerodynamického odporu vodičů C_c (-), určíme v závislosti na průměru vodiče z tab. 8 [15].

Tab. 8- Koeficient aerodynamického odporu vodičů [15]

Koeficient aerodynamického odporu vodičů C_c	Průměr vodiče d (mm)
1	$d \geq 16$ mm
1,1	$12,5 \leq d < 16$ mm
1,2	$d < 12,5$ mm

Následně můžeme stanovit výslednou sílu na vodiče. Ta se určí prostým součtem sil působících na každý vodič ve svazku. Při působení větru na vodič se určí pomocí vztahu 5.15. Lepší dokreslení skutečnosti zobrazuje obr. 13 [22].



Obr. 13 - Přetížení vodiče větrem [17]

$$z = \frac{q_{vysl}}{q_1} = \frac{\sqrt{q_1^2 + q_{wc}^2}}{q_1}, \quad (5.15)$$

kde q_1 je vlastní tíha vodiče (N/m)

Síla větru na podpěrný bod v přímé trase

Síla větru na podpěrný bod v přímé trase má horizontální směr a kolmý vzhledem k trase vodičů. Na podpěrný bod působí síly z každé jeho strany, tedy z dvou sousedních rozpětí. Určí se pro vodič v rozsahu rozpětí polovin sousedních rozpětí dle vztahu

$$Q_{wc} = q_h \cdot G_q \cdot G_{DC} \cdot C_c \cdot d \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} \cdot \cos^2 \phi, \quad (5.16)$$

kde a_1 a a_2 jsou délky dvou sousedních rozpětí k podpěrnému bodu (m)

Síla větru na izolátorové závěsy

Síla větru na izolátorové závěsy je určena jednak silou větru působící na samotné izolátory, ale také silou větru, která působí na vodiče. Síla větru působící na izolátorový závěs v podpěrném bodě Q_{Wins} (N) je dána vztahem

$$Q_{Wins} = q_h \cdot G_q \cdot G_{Dins} \cdot C_{ins} \cdot A_{ins}, \quad (5.17)$$

kde G_{Dins} je dynamický koef. rezonance pro izolátorové závěsy (v rozmezí 1,05-1,15) (-)

C_{ins} je koeficient aerodynamického odporu pro izolátorové závěsy je roven 1,2 (-)

A_{ins} je plocha izolátorového závěsu na kterou vítr působí (m²)

Následkem působení větru se izolátorové závěsy vychýlí ze své svislé polohy. Tohle vychýlení nesmí překročit mez, kdy by byla ohrožena bezpečná izolační vzdálenost okolních konstrukcí nebo vedlejších vodičů.

Síla větru na příhradové stožáry

Tato síla se skládá z působení více sil na jednotlivé části vedení. Konkrétně to jsou síly na vodiče, izolátorové závěsy a samotnou konstrukci stožáru. Z důvodu velké výšky stožárů je nutné pro příhradové stožáry s pravoúhlým příčným řezem počítat síly po částech. Stožár si

rozdělíme do segmentů. Výška jednoho segmentu zhruba odpovídá půlce obvodu jednoho stožáru. Síla větru působící na tento segment je dána jako

$$Q_{Wt} = q_h \cdot G_q \cdot G_{Dt} \cdot [1 + 0,2 \sin^2(2\phi)] \cdot (C_{t1} \cdot A_{t1} \cdot \cos^2 \phi + C_{t2} \cdot A_{t2} \cdot \sin^2 \phi) , \quad (5.18)$$

kde G_{Dt} je dynamický koeficient stožáru (-)

C_{t1} je koef. aerodynamického odporu čelní stěny 1. panelu kolmé na směr větru (-)

C_{t2} je koef. aerodynamického odporu čelní stěny 2. panelu kolmé na směr větru (-)

A_{t1} je účinná plocha prvků čelní stěny 1. panelu (m^2)

A_{t2} je účinná plocha prvků čelní stěny 2. panelu (m^2)

ϕ je úhel směrem větru a podélnou osou příhradové konzoly ($^\circ$)

Síla větru na příhradové konzoly

Síla větru na příhradové konzoly je přibližně dána vztahem

$$Q_{Wtc} = q_h \cdot G_q \cdot G_{Dt} \cdot C_{tc} \cdot A_{tc} \cdot (\sin \phi + 0,4 \cos \phi) , \quad (5.19)$$

kde C_{tc} je koeficient aerodynamického odporu příhradové konzoly (-)

A_{tc} je účinná plocha prvků čelní stěny příhradové konzoly (m^2)

5.5 Kombinované zatížení větrem a námrazou

Budeme se zabývat pouze kombinovaným zatížením větrem a námrazou na vodiče. Pokud bychom se chtěli zabývat kombinovaným zatížením i pro ostatní části vedení, tak stačí změnit aerodynamický součinitel na aerodynamický součinitel pro omrzlé izolátory nebo stožárové konstrukce. Účinek námrazy na vodič závisí na třech skutečnostech [28]

- rychlost větru v době, kdy je vodič pokryt námrazou
- hmotnost námrazové vrstvy na vodiči
- tvarem námrazové vrstvy

Při zjišťování kombinovaného zatížení vodiče větrem a námrazou nejprve stanovíme hodnotu součinitele kombinovaného zatížení větrem a námrazou ψ_{wc} z tab. 4 [15]. Dynamický tlak větru na omrzlý vodič q_{hcl} (N/m^2) určíme vztahem [15]

$$q_{hcl} = q_h \cdot \psi_{wc} , \quad (5.20)$$

kde q_h je dynamický tlak větru (N/m^2)

Jednotkové zatížení omrzlého vodiče větrem q_{wc} (N/m) stanovíme vztahem [15]

$$q_{wc} = q_{hcl} \cdot G_q \cdot G_c \cdot C_{cl} \cdot D \cdot \cos^2 \phi, \quad (5.21)$$

kde q_{hcl} je dynamický tlak větru na omrzlý vodič (N/m²)
 G_q je nárazový koeficient větru (-)
 G_c je dynamický koeficient daného konstrukčního prvku (-)
 C_{cl} je aerodynamický součinitel omrzlého vodiče (-) $C_{cl} = 1,1$
 D je průměr vodiče s námrazou (m)
 ϕ je úhel náběhu mezi uvažovaným směrem větru a směrem rozpětí (°)

Přetížení vodiče větrem a námrazou se určí jako poměrná hodnota nového přetížení vůči tíze vodiče bez námrazy a působení větru. Určí se dle vztahu [15]

$$z = \frac{\sqrt{(q_1 + I_d)^2 + (q_{wc})^2}}{q_1}, \quad (5.22)$$

kde q_1 je zatížení vodiče bez námrazy (N/m)
 I_d je návrhové zatížení námrazou na jednotku délky vodiče (N/m)
 q_{wc} je jednotkové zatížení omrzlého vodiče větrem (N/m)

5.6 Vibrace a ochrana proti rozkmitání vodičů

Vibrace chápeme jako kmitání vodičů ve svislé rovině způsobené působením větru. Perioda kmitání je závislá na velikosti vodiče, rychlosti větru a tahu vodiče. Dlouhodobým působením vibrací může dojít k narušení pevnosti vodiče a následně k jeho přetržení. Vlivem vibrací může nastat poškození izolace nebo armatur. Vibrace je následkem působení větru nižší rychlosti na vodič, za nímž vytváří vzdušné víry. Tyto víry se často mění a těmito změnami jsou podmínky v okolí vodiče každým okamžikem různé. Výsledkem těchto změn je vznik nárazů do vodiče a následně vibrací.

Zatímco některé vodiče jsou po třech až čtyřech letech provozu zničené, tak jiné vydrží bez poruchy spoustu let. Na odolnost vodiče vůči vibracím mají vliv různé faktory. Na základě dlouholetých zkušeností byly jako nejdůležitější stanoveny tyto faktory [22]:

- Charakter větru. Vibrace jsou způsobeny větrem o malých rychlostech (0,5 m/s až 10 m/s). Vítr musí působit v úhlu v rozmezí od 30 ° do 90 °.
- Terénní podmínky trasy vedení. Pro vznik vibrací je potřeba rovnoměrného působení větru. Vítr působí rovnoměrně v rovném a mírně členitém terénu. Ve výše položených oblastech je následkem velké členitosti terénu tato rovnoměrnost narušena a vibrace většinou nevznikají.
- Výška vodičů nad zemí. Výška vodičů ovlivňuje rovnoměrnost větru. V zásadě platí, že čím výš je vodič umístěn, tím je vítr rovnoměrnější a dochází tak častěji k vibracím.
- Rozpětí stožárů. Nejdůležitější faktor. Pozorováním bylo zjištěno, že u rozpětí do 100 m k vibracím téměř nedochází.

Samotná vibrace vodič neohrožuje. Poškození vzniká až následkem namáhání vodiče. Poruchám vodičů působením vibrací můžeme zabránit pasivní nebo aktivní obranou. O těchto ochranách pojednává literatura [22].

Pasivní ochrana snižuje následky působení vibrací, a tak chrání vodič před poškozením. Mezi prostředky pasivní ochrany řadíme například zmenšení statického tahu ve vodiči. Tímto opatřením se zmenší mechanické napětí na takovou hodnotu, že spolu s přídatným zatížením nepřekročí dovolené mechanické napětí. Negativním následkem tohoto opatření je zvětšení průhybu vodičů. Proto je tento způsob ochrany téměř nepoužíván. Další možností pasivní ochrany proti vibracím je využití lehkých výkyvných svorek. Tyto svorky sledují pohyb vodiče a tím sníží dynamické namáhání vznikající na výstupu vodiče ze svorky. Dalšími možnostmi je použití festonů. Což jsou lana volně zavěšené na obou stranách svorky a upevněné v několika místech vodiče, kde byli pozorovány kmitny.

Aktivní ochrana zamezuje vlastnímu kmitání vodičů. Mezi prostředky aktivní ochrany proti vibracím řadíme antivibrační lana (popsána v kapitole speciálních vodičů) a tlumiče vibrací. Jsou to zařízení, která při vzniku vibrací vytváří síly fázově posunutě za pohyby vodiče a působí tak proti kmitání vodičů. Tlumiče se umísťují do místa amplitudy kmitání. Používají se pákové, kývavé, pružinové a pneumatické.

Nejčastěji se využívá kombinace tlumičů a výkyvných svorek. U vodičů v trojsvazku se jako dostačující ochrana považují rozpěrky pro přiblížení jednotlivých lan.

Zajímavým faktem je jev označovaný jako tzv. tančení vodičů. Dochází k němu při mírně omrznutých vodičů nebo při současném působení větru a odpadávání námrazy. Vodiče se rozkmitají či takzvaně „roztančí“ vlněním s několika násobnou amplitudou, nízkou frekvencí a vlnou dlouhou až desítky metrů. Tento jev může trvat až několik hodin a může způsobit velké škody na vedení. Tančení vodičů výrazně namáhá izolátorové závěsy a stožárové konstrukce. Mnohdy dochází i k jejich poškození.

6 Mechanika venkovního vedení

Zkoumáním mechaniky vodiče rozumíme určení jeho mechanických vlastností. Těmi jsou zejména průhyb vodiče a mechanické napětí ve vodiči. Při projektování vedení, ale i při provozu vedení, je důležité znát tyto mechanické vlastnosti, a to z několika důvodů dle [22].

Prvním jsou bezpečnostní důvody. Jak již bylo zmíněno výše (kap. Bezpečná vzdálenost vedení od okolí) je normou dána bezpečná vzdálenost vodiče od okolního terénu, pozemních komunikací, jiných vedení či dalších možných překážek v cestě vedení. Tato vzdálenost musí být splněna při všech možných stavech. Největší ohrožení bezpečnosti nastává při kombinovaném působení větru a námrazy nebo vysoké teplotě.

Dalším jsou provozní důvody. V provozu musí být vedení co nejvíce mechanicky odolné (pevné) při různých klimatických podmínkách, aby byla co nejméně ohrožena schopnost dodávky elektrické energie. Jinými slovy to znamená, že vedení musí mít co největší provozní bezpečnost.

Posledním jsou ekonomické důvody. Vhodnou volbou mechanického napětí ve vodičích a tím i zmenšení průhybu vedení, můžeme zvolit menší stožáry a základové konstrukce. Tím snížíme i celkovou cenu.

Dokonale pružný vodič, který je zavěšený mezi dvěma body ve stejné výšce, se prohne do dokonalé průhybové křivky. Touto křivkou je parabola. Dokonale pružný vodič je ovšem pouze ideální případ, který nemůže nastat. Proto byl vytvořen model řetězovky, který výrazněji přesně popisuje toto chování vodiče. Pro stanovení průhybové křivky máme tři základní předpoklady [15]:

- Pružná řetězovka - Jedná se o nejpřesnější popis skutečného průhybu vodiče. Tíha elementu délky vodiče působí na protažení v daném místě. Počítá i s pružností vodiče. Z důvodu výpočetní náročnosti není tento popis využíván.
- Řetězovka - U tohoto předpokladu uvažujeme, že tíha elementu délky vodiče je ve všech místech vodiče stejná a je rovnoměrně rozložena po celé jeho délce. Rozdíly ve výsledcích klasické a pružné řetězovky jsou pouze nepatrné. Proto nejčastěji počítáme právě s řetězovkou. Využívá se zejména pro delší rozpětí nebo velké sklony terénu.
- Parabola - U paraboly předpokládáme, že váha vodiče i přídatného zatížení je rovnoměrně rozdělena po spojnici zavěšení. Tento přístup využíváme u kratších rovinatých rozpětí, kde se od řetězovky tolik neliší.

6.1 Odvození průhybové křivky - souměrná řetězovka

Odvození rovnice souměrné řetězovky jsou čerpán z literatury [15] a [22]. Pro odvození průhybových křivek budeme brát pouze případ, kdy jsou oba konce lana zavěšeny ve stejné

výšce. Tento případ nazýváme jako souměrná řetězovka. Při odvozování samotné průhybové křivky vycházíme z mechanických podmínek rovnováhy. Vodič se nachází v klidu, pokud je vektorový součet všech sil na něj působících nulový a zároveň je také nulový součet momentů sil k libovolnému bodu vodiče. Na průhybové křivce se zvolí libovolný element délky a ověří se pro něj podmínky rovnováhy. Tuto skutečnost ilustruje obr. 14 [15]. Matematicky vyjádříme tyto podmínky jako

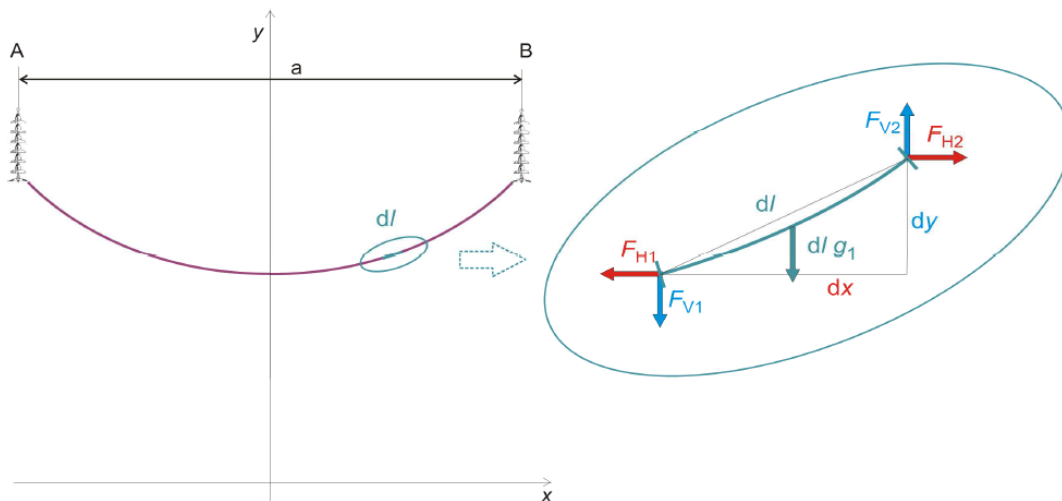
$$\sum F_x = 0 , \quad (6.1)$$

$$\sum F_y = 0 , \quad (6.2)$$

$$\sum M = 0 , \quad (6.3)$$

kde F_x a F_y jsou síly ve směru osy x resp. y (N)

M je moment síly F_x nebo F_y k určitému bodu (Nm)



Obr. 14 - Řetězovka [15]

Z podmínky rovnováhy sil v ose x vyplývá, že vodorovná složka síly F_H bude stejná v každém bodě křivky. Platí

$$F_{H1} - F_{H2} = 0 . \quad (6.4)$$

Z podmínky rovnováhy sil v ose y vyplývá, že vertikální složka síly F_V v daném bodě je rovna tíze vodiče příslušné délky dl . Minimální (nulová) je ve vrcholu své průhybové křivky. Naopak maximální je v místě zavěšení. Platí

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_{V2} - F_{V1} - g_1 \cdot dl = 0 \Rightarrow dF_V = g_1 \cdot dl . \quad (6.5)$$

Z obr. 14 plyne vztah pro element délky.

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (6.6)$$

Dosazením elementu délky do rovnice 6.5 dostaneme

$$dF_V = g_1 \cdot \sqrt{dx^2 + dy^2} . \quad (6.7)$$

Vztah 6.7 můžeme vyjádřit jako

$$\frac{dF_V}{dx} = g_1 \cdot \sqrt{\frac{dx^2 + dy^2}{dx^2}} = g_1 \cdot \sqrt{1 + \frac{dy^2}{dx^2}} = g_1 \cdot \sqrt{1 + (y')^2} . \quad (6.8)$$

Podmínku rovnováhy momentů (6.3) k počátku soustavy souřadnic vyjádříme jako

$$F_H dy = F_V dx . \quad (6.9)$$

Po úpravách dostáváme vztah

$$F_V = F_H \cdot \frac{dx}{dy} \Rightarrow \frac{dF_V}{dx} = F_H \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} . \quad (6.10)$$

Dosazením tohoto vztahu do rovnice 6.8 dostaneme diferenciální rovnici průhybové křivky

$$\frac{dF_H d^2 y}{dx^2} = g_1 \cdot \sqrt{1 + (y')^2} \Rightarrow dF_H \frac{dy'}{dx} = g_1 \cdot \sqrt{1 + (y')^2} . \quad (6.11)$$

Tuto diferenciální rovnici po separaci proměnných řešíme integrací.

$$\int \frac{dy'}{\sqrt{1 + (y')^2}} dx = \frac{g_1}{F_H} \int dx \quad (6.12)$$

$$\operatorname{arcsinh} y' = \frac{g_1}{F_H} \cdot (x + k_1) \quad (6.13)$$

$$y' = \sinh \left[\frac{g_1}{F_H} \cdot (x + k_1) \right] \quad (6.14)$$

Integrací vztahu 6.14 získáme rovnici průhybové křivky.

$$y = \frac{F_H}{g_1} \cdot \cosh \left[\frac{g_1}{F_H} \cdot (x + k_1) \right] + k_2 \quad (6.15)$$

Integrační konstanty k_1 a k_2 můžeme určit z okrajových podmínek. Na obr. 15 je vidět, že když $x = 0$, tak pro derivaci y platí $y' = 0$ a z toho plyne, že $y = c$ pak

$$0 = \sinh \left(k_1 \cdot \frac{g_1}{F_H} \right) \Rightarrow k_1 = 0 . \quad (6.16)$$

Pokud do rovnice průhybové křivky (6.15) dosadíme za $x = 0$, $y = c$ a $k_1 = 0$ dostaneme

$$y = c = \frac{F_H}{g_1} \cdot \cosh \left[\frac{g_1}{F_H} \cdot (0 + 0) \right] + k_2 = \frac{F_H}{g_1} + k_2 . \quad (6.17)$$

Kde c (m) je parametr řetězovky pro který platí vztah

$$c = \frac{F_H}{g_1} = \frac{\sigma_H}{\gamma} \Rightarrow k_2 = 0 . \quad (6.18)$$

Pokud budeme uvažovat přetížení námrazou, tak můžeme parametr vyjádřit jako

$$c = \frac{F_H}{g_1 \cdot z} = \frac{\sigma_H}{\gamma \cdot z} . \quad (6.19)$$

Parametrem c rozumíme vzdálenost vrcholu řetězovky od počátku souřadnicového systému. Obecně platí fakt, že čím je parametr vyšší číslo, tím je vodič více natažený a má menší průhyb. Při návrhu vedení je důležité dodržet podmínku, že parametr zemního lana musí být vyšší než parametr fázového vodiče. Je tím zajištěna skutečnost, aby se zemnicí lano neprohnulo tak, že ohrozí elektrickou izolaci fázových vodičů.

Výsledný tvar rovnice řetězovky je

$$y = c \cdot \cosh \frac{x}{c} = \frac{\sigma_H}{\gamma \cdot z} \cdot \cosh \frac{x \cdot \gamma \cdot z}{\sigma_H} , \quad (6.20)$$

kde F_H je vodorovná složka tahu ve vodiči (N)

g_1 je tíha jednoho metru vodiče (N/m)

σ_H je vodorovné namáhání ve vodiči (Pa)

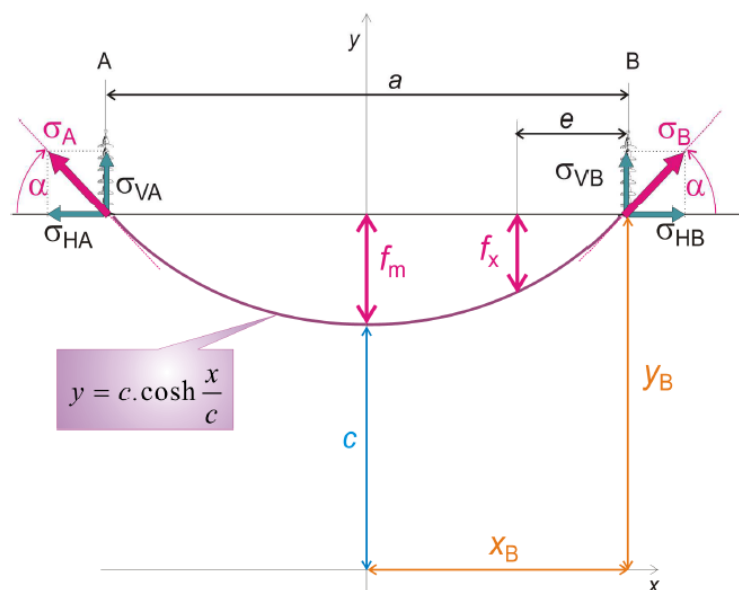
γ je měrná tíha vodiče (N/m³)

z přetížení vodiče (-)

6.1.1 Mechanický výpočet vodiče

Mechanickým výpočtem vodiče v praxi rozumíme stanovení skutečných rozměrů vodiče, vzdáleností od okolí a namáhání vodiče. Většinou je potřeba stanovit skutečnou délku vodiče, maximální průhyb vodiče, průhyb v daném místě vedení a namáhání v závěsném bodě. Tyto veličiny jsou znázorněny na obr. 15 [15].

Jak již bylo zmíněno výše, tak souměrným polem nazývá situaci, kdy jsou oba závěsné body ve stejné nadmořské výšce. Vzdálenost mezi těmito body označujeme jako rozpětí a (m).



Obr. 15 - Mechanický výpočet vodiče [15]

Maximální průhyb vodiče

Průhyb souměrného vodiče je maximální v polovině rozpětí. Maximálním průhybem f_m (m) rozumíme největší kolmou vzdálenost spojnice závěsných bodů od vodiče. To znamená, že pro zjištění maximálního průhybu stačí do rovnice řetězovky dosadit vzdálenost $a/2$ (vzdálenost závěsných bodů od poloviny rozpětí neboli od osy y) a odečíst parametr c .

$$f_m = y_B - c = c \cdot \cosh \left(\frac{a}{2 \cdot c} \right) - c \quad (6.21)$$

Výpočet průhybu vedení v libovolném bodě

Při výpočtu průhybu vedení v libovolném bodě budeme opět vycházet z rozdílu dvou hodnot. Od y-ové souřadnice závěsného bodu y_B odečteme vzdálenost y-ové souřadnice libovolného bodu x .

$$f_x = y_B - y = c \cdot \cosh\left(\frac{a}{2 \cdot c}\right) - c \cdot \cosh\left(\frac{x}{c}\right) = c \cdot \left[\cosh\left(\frac{a}{2 \cdot c}\right) - \cosh\left(\frac{\frac{a}{2} - e}{c}\right) \right], \quad (6.22)$$

kde $e = \frac{a}{2} - x \quad (\text{m})$

Výpočet skutečné délky vodiče

Skutečnou délkou vodiče rozumíme délku vodiče mezi dvěma závěsnými body respektující průhyb vodiče. Vypočítá se pomocí integrálu jako délka souměrné řetězovky.

$$l_s = \int_{-a/2}^{a/2} \sqrt{1 + (y')^2} \cdot dx = 2 \cdot \int_0^{a/2} \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{c}} \cdot dx \quad (6.23)$$

$$l_s = \int_0^{a/2} \sqrt{\cosh^2 \frac{x}{c} - \sinh^2 \frac{x}{c} + \sinh^2 \frac{x}{c}} \cdot dx = 2 \cdot \int_0^{a/2} \cosh \frac{x}{c} \cdot dx \quad (6.24)$$

$$l_s = 2 \cdot c \cdot \left[\sinh \frac{x}{c} \right]_0^{a/2} = 2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c} \quad (6.25)$$

Stanovení mechanického napětí ve vodiči

Celkové mechanické napětí v závěsném bodě je dáno vektorovým součtem vertikální a horizontální složky namáhání. Tuto skutečnost dokresluje obr. 15 [15]. Velikost vertikální složky namáhání σ_V je dána místem ve kterém uvažujeme daný bod. Naopak velikost horizontální složky namáhání σ_H je stejná v každém bodě průhybové křivky a tvoří pro dovolené mechanické napětí σ_{dov} . Vertikální složka je nulová ve vrchole průhybové křivky a naopak maximální v závěsném bodě.

Dle obr. 15 [15] platí

$$\sigma_B = \frac{\sigma_H}{\cos \alpha}$$

$$\tan \alpha = y' = \sinh \frac{a}{2 \cdot c}$$

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \sqrt{\tan^2 \alpha + 1} = \sqrt{\sinh^2 \frac{a}{2 \cdot c} + \cosh^2 \frac{a}{2 \cdot c} - \sinh^2 \frac{a}{2 \cdot c}} = \cosh \frac{a}{2 \cdot c} = \frac{y_B}{c} = \frac{f_m}{c} + 1$$

Dosazení do prvního vztahu dostaneme, že pro namáhání v závěsném bodě σ_B platí

$$\sigma_B = \sigma_H \cdot \left(\frac{f_m}{c} + 1 \right) = f_m \cdot z \cdot \gamma + \sigma_H \quad (6.26)$$

Pro vertikální složku namáhání v závěsném bodě σ_{VB} platí vztah

$$\sigma_{VB} = \sigma_H \cdot \tan \alpha = \sigma_H \cdot \sinh \frac{a}{2 \cdot c} = \sigma_H \cdot \frac{l_s}{2 \cdot c} = \frac{l_s}{2} \cdot \gamma \cdot z \quad (6.27)$$

6.2 Průhybová křivka - souměrná parabola

Rovnice paraboly se využívá pro krátká vedení. U krátkých vedení je rozdíl mezi řetězovkou a parabolou zanedbatelný. Jedná se tedy o určité zjednodušení, kterou si ale v určitých případech můžeme dovolit. Rovnici lze odvodit stejným způsobem, jako bylo popsáno u řetězovky. Rozdíl je v tom, že u paraboly uvažujeme, že tíha vodiče g_1 je stálá a rovnoměrně rozložená po spojnici závěsných bodů. Takže uvažujeme délku x namísto délky l , ekvivalentně poté dx a dl .

Rovnici paraboly můžeme také získat z již odvozené rovnice řetězovky. Funkci \cosh rozvedeme v rovnici na mocninou řadu a změníme umístění na osách souřadného systému odečtením parametru c , aby křivka protínala počátek soustavy souřadnic ve svém minimu.

$$y = c \cdot \left[1 + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{x}{c} \right)^2 + \frac{1}{4!} \cdot \left(\frac{x}{c} \right)^4 + \dots \right] - c \quad (6.28)$$

Po zanedbání třetího a dalších členů rozvoje dostaneme konečný tvar průhybové křivky

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot c} = \frac{x^2 \cdot \gamma \cdot z}{2 \cdot \sigma_H} . \quad (6.29)$$

Tyto členy můžeme zanedbat, protože mají minimální vliv na výsledek. Nahrazením rovnice řetězovky parabolou vzniká určitá chyba, která roste se zvětšující se délkou rozpětí mezi závěsnými body. U běžných vedení tvoří průhyb maximálně 6 % délky rozpětí. Z toho plyne, že chyba bude maximálně 0,5 %. Zvětšuje se ovšem s rostoucí délkou rozpětí. Pro větší rozpětí, kde dochází k větším průhybům, jsme nuceni použít rovnici řetězovky.

6.2.1 Mechanický výpočet vodiče

Mechanický výpočet vodiče pomocí paraboly vychází ze stejných vztahů jako pro řetězovku. Popsané veličiny vychází z obr. 16 [15].

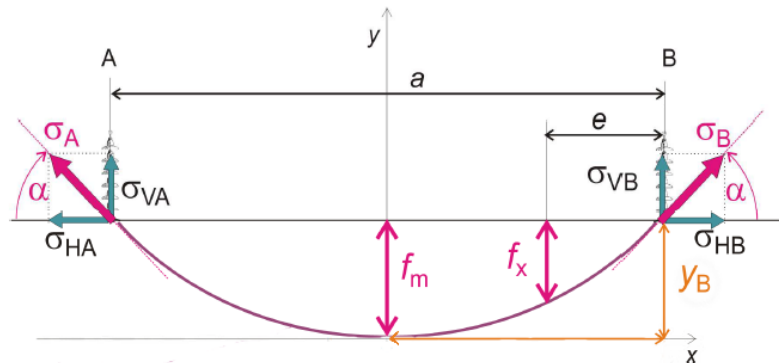
Maximální průhyb vodiče

Průhyb souměrného vodiče je maximální v polovině rozpětí. Maximálním průhybem f_m (m) rozumíme největší kolmou vzdálenost spojnice závěsných bodů od vodiče. To znamená, že pro zjištění maximálního průhybu stačí do rovnice řetězovky dosadit vzdálenost $a/2$. V tomto případě není potřeba odečítat parametr c , poněvadž uvažujeme podmínku, že křivka ve svém maximu protíná počátek soustavy souřadnic. Takže platí

$$f_m = y_B = \frac{x^2}{2 \cdot c} , \quad (6.30)$$

kde pro vzdálenost x platí podmínka $x = \frac{a}{2}$ a po dosazení do vztahu 6.30 bude platit

$$f_m = \frac{a^2}{8 \cdot c} . \quad (6.31)$$



Obr. 16 - Mechanický výpočet vodiče - parabola (modifikováno z [15])

Výpočet průhybu vedení v libovolném bodě

Při výpočtu průhybu vedení v libovolném bodě budeme vycházet z rozdílu dvou hodnot. Od maximálního průhybu křivky f_m (y-ová souřadnice závěsného bodu B) odečteme vzdálenost y-ové souřadnice libovolného bodu x.

$$f_x = y_B - y_x = \frac{a^2}{8 \cdot c} - \frac{x^2}{2 \cdot c} = \frac{a^2}{8 \cdot c} - \frac{\left(\frac{a}{2} - e\right)^2}{2 \cdot c}, \quad (6.32)$$

kde $e = \frac{a}{2} - x$ (m)

Dosazením a matematickými úpravami dostaneme vztah ve tvaru

$$f_x = \frac{e \cdot (a - e)}{2 \cdot c}. \quad (6.33)$$

Výpočet skutečné délky vodiče

Skutečná délka vodiče stanovená z rovnice paraboly vychází ze vztahu pro skutečnou délku vodiče odvozenou v předešlé kapitole. Kdy pro délku l_s platí

$$l_s = 2 \cdot c \cdot \sinh \frac{x}{c}. \quad (6.34)$$

Rozvojem této funkce získáme rovnici ve tvaru

$$l_s = 2 \cdot c \cdot \left(\frac{x}{1! \cdot c} + \frac{x^3}{3! \cdot c^3} + \frac{x^5}{5! \cdot c^5} + \dots \right) \quad (6.35)$$

a dosazením $a/2$ za x dostaneme tvar

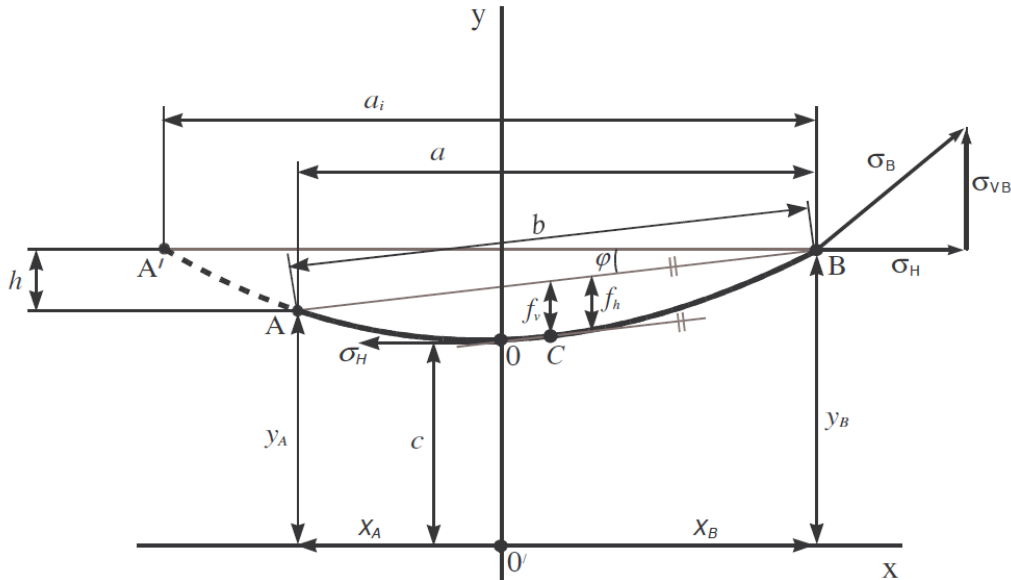
$$l_s = 2 \cdot \left(\frac{a}{2} + \frac{a^3}{3! \cdot 2^3 \cdot c^2} + \frac{a^5}{5! \cdot 2^5 \cdot c^4} + \dots \right). \quad (6.36)$$

V praxi můžeme zanedbat další rozvoj a uvažovat pouze první dva členy. Zjednodušeně lze výsledný vztah zapsat ve tvaru

$$l_s = a + \frac{a^3}{24 \cdot c^2}. \quad (6.37)$$

6.3 Nesouměrně zavěšený vodič

Nesouměrně zavěšený vodič je takový, u kterého nejsou jeho závěsné body ve stejné výšce a vrchol průhybové křivky neleží uprostřed rozpětí. V praxi se jedná o většinu případů. Při výpočtech nesouměrně zavěšených vodičů je vhodnější použít rovnici řetězovky, protože lépe vystihuje rozložení tvar průhybové křivky.



Obr. 17 - Nesouměrně zavěšený vodič [29]

Dle obr. 17 [29] definujeme některé veličiny. Rozdíl výšek závěsných bodů označujeme jako převýšení h . Vodorovná vzdálenost dvou závěsných bodů zůstává označována jako a . Vzdálenost mezi dvěma závěsnými body označíme jako šikmou vzdálenost b . Nesouměrně zavěšený vodič řešíme tak, že průhyb doplníme o závěsný bod A' . Tento bod vznikne doplněním nesouměrného závěsu na závěs souměrný, tak aby byl zachován stejný tvar průhybové křivky. Vzdálenost mezi body A' a B definujeme jako ideální délku rozpětí a_i (m).

Z obr. 17 [29] je patrný vztah pro výpočet výškového rozdílu sousedních závěsů h_i . Z tohoto vztahu vyjdeme.

$$h_i = y_A - y_B = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} - c \cdot \cosh \frac{x_A}{c} = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{a-x_B}{c} \right) \quad (6.38)$$

Rozkladem hyperbolických funkcí, který je podrobněji popsán v literatuře [22] dostaneme následující tvar rovnice, která určuje souřadnici x_B závěsného bodu

$$x_B = \frac{a}{2} + c \cdot \left(\frac{h_i}{2 \cdot c \cdot \sinh \frac{a}{2c}} \right) = \frac{a}{2} + c \cdot \frac{h}{l_s} \quad (6.39)$$

Následně získáme i y-ovou souřadnici závěsného bodu tedy y_B

$$y_B = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} \quad (6.40)$$

Vzdálenost níže položeného závěsného bodu (bod A) od vrcholu řetězovky je

$$x_A = a - x_B = \frac{a}{2} - c \cdot \frac{h_i}{l_s} \quad (6.41)$$

Potom můžeme určit délku ideálního rozpětí ve tvaru

$$a_i = 2 \cdot x_B = a + 2 \cdot c \cdot \frac{h_i}{l_s} . \quad (6.42)$$

Pokud budeme uvažovat fakt, že vrchol průhybové křivky bude vždy protínat osu y a x -ová souřadnice výše položeného bodu bude vždy kladná, tak mohou pro x -ovou souřadnici níže položeného bodu (x_A) nastat následující tři možnosti:

- Vrchol řetězovky leží mezi dvěma závěsnými body, tak pro x_A platí

$$x_A < 0$$

- Níže položený závěsný bod leží ve vrchole průhybové křivky pokud

$$x_A = 0$$

- Vrchol řetězovky neleží mezi dvěma závěsnými body, ale závěsné body leží na stejné straně průhybové křivky tak platí podmínka

$$x_A > 0$$

V posledním případě je možnost vzniku nebezpečné situace, kdy vodič svým tahem nadzvedá spodní izolátor. Taková situace může nastat například při extrémním zkrácení vodiče následkem nízkých teplot a umístění vedení ve svahu s velkým sklonem. Potom je nutné izolátor zespoda přidavně zatížit nebo uchytit dalším izolátorem.

Maximální průhyb ideálního pole

Jedná se o maximální průhyb f_m vodiče, pokud jsou oba závěsné body ve stejné výšce. Platí

$$f_m = y_B - c = c \cdot \left(\cosh \frac{x_B}{c} - 1 \right) . \quad (6.43)$$

Průhyb v libovolném bodě nesouměrného pole

Podle obr. 17 platí vztah pro průhyb v libovolném bodě křivky f_x

$$f_x = y_B - y_x = c \cdot \cosh \frac{x_B}{c} - c \cdot \cosh \frac{x}{c} . \quad (6.44)$$

Charakteristický průhyb

Charakteristický průhyb je definován jako svislá délka mezi polovinou spojnice závěsných bodů a průhybovou křivkou, neboli průhyb uprostřed rozpětí. Vzdálenost bodu s charakteristickým průhybem od počátku x_k je dána vztahem

$$x_k = \frac{x_A + x_B}{2} - x_A = \frac{x_B - x_A}{2} \quad (6.45)$$

Poté charakteristický průhyb f_k určíme ze vztahu

$$f_k = f_m \cdot \cosh \frac{x_k}{c} \quad (6.46)$$

Viditelný průhyb

Viditelný průhyb f_v je definován jako svislá vzdálenost mezi spojnicí závěsných bodů a tečnou ke křivce, která je rovnoběžná se spojnicí závěsných bodů. Nejdříve určíme vzdálenost bodu s viditelným průhybem od počátku x_v (m), kdy platí

$$\tan \varphi = \frac{h}{a} = \sinh \frac{x_v}{c} , \quad (6.47)$$

$$x_v = c \cdot \arg \sinh \frac{h_i}{a} . \quad (6.48)$$

Na základě známých hodnot x_v a x_B určíme hodnoty y -ových souřadnic těchto bodů

$$y_B = c \cdot \cosh \left(\frac{x_B}{c} \right) ; \quad y_v = c \cdot \cosh \left(\frac{x_v}{c} \right) .$$

Výškový rozdíl v místě viditelného průhybu h' (m) vyjádříme na základě podobnosti trojúhelníků jako

$$h' = (x_B - x_v) \cdot \frac{h_i}{a} . \quad (6.49)$$

Viditelný průhyb je potom dán vztahem

$$f_v = y_B - y_v - h' . \quad (6.50)$$

Délka nesouměrné řetězovky

Ke vztahu pro délku nesouměrné řetězovky se dostaneme stejně jako u souměrného zavěšení, jen s jinými integračními mezemi. Po integraci dostaneme vztah

$$l_{AB} = c \cdot \sinh \frac{x_B}{c} + c \cdot \sinh \frac{x_A}{c} . \quad (6.51)$$

Mechanické napětí ve vodiči

Vodorovná složka namáhání σ_H je stejná jako u souměrného závěsu. Svislá složka namáhání v závěsném bodě A σ_{VA} , respektive B σ_{VB} , je odlišná od souměrného zavěšení vodiče. Pro tyto složky platí

$$\sigma_{VA} = l_A \cdot \gamma \cdot z , \quad (6.52)$$

$$\sigma_{VB} = l_B \cdot \gamma \cdot z , \quad (6.53)$$

kde l_A a l_B jsou délky větví řetězovky od příslušného závěsného bodu (m)

Svislé složky tahu v závěsných bodech A a B můžeme vyjádřit jako

$$F_{VA} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) - F_{VC} , \quad (6.54)$$

$$F_{VB} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) + F_{VC} , \quad (6.55)$$

Z těchto vztahů vyplývá, že svislá složka síly ve výše položeném závěsném bodě B se rovná součtu rozdílu tíhy polovičního rozpětí a svislé složky síly v polovině rozpětí F_{VC} . Pro kterou platí vztah

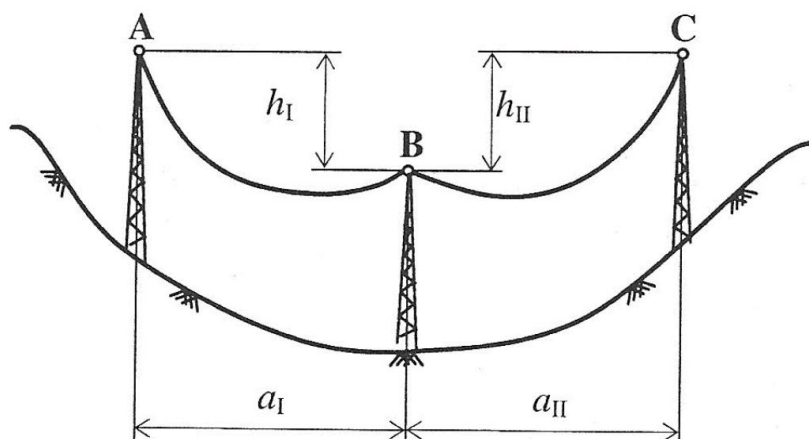
$$F_{VC} = F_H \cdot \tan \varphi = F_H \cdot \frac{h_i}{a} . \quad (6.56)$$

Následně můžeme vztahy pro svislé složky tahu v závěsných bodech vyjádřit jako

$$F_{VA} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) - F_H \cdot \frac{h_i}{a} , \quad (6.57)$$

$$F_{VB} = \frac{a}{2} \cdot (q_1 + q_2) + F_H \cdot \frac{h_i}{a} . \quad (6.58)$$

Z následujících vztahů je zřejmé, že pokud vrchol řetězovky padne mimo závěsné body, tak dostáváme zápornou svislou sílu, což znamená sílu zdvihací. V praxi je to častý problém tzv. utopených stožárů (obr. 18 [22]), kde může dojít k překlopení izolátorových závěsů nad konzoli.



Obr. 18 - Utopený stožár [22]

6.4 Stavová rovnice napnutého vodiče

Při změně teploty se mění mechanické napětí ve vodiči a tím i jeho průhyb. Stavová rovnice vyjadřuje vliv změny teploty a atmosférických vlivů na mechanické napětí ve vodiči. Mechanický výpočet realizujeme pro nejnepříznivější případ, který může nastat. To znamená pro takové podmínky, kdy nastává největší průhyb, tedy nejmenší vzdálenost od země resp. od okolních objektů.

Vodič se při montáži musí napnout na takové napětí a průhyb, aby i při nejnepříznivějších podmínkách splňoval podmínky bezpečného provozu vedení. Vodiče se montují při různých podmínkách, tak je nutné sestavit montážní tabulku pro různé stavy. V této tabulce jsou uvedeny hodnoty mechanického namáhání a dané průhyby v závislosti na teplotě, přetížení námrazou a teplotu -5 °C. Interval teplot se pohybuje od -30 °C do +80 °C.

6.4.1 Odvození stavové rovnice

Při odvozování stavové rovnice budu postupovat dle literatury [22]. Indexem nula bude označen počáteční stav a indexem 1 montážní neboli ten hledaný.

Předpokládejme nárůst teploty z hodnoty ϑ_0 na hodnotu ϑ_1 . Tímto zvýšením teploty se vodič prodlouží o hodnotu danou rovnicí teplotní roztažnosti látek

$$\Delta l_{\vartheta} = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) , \quad (6.59)$$

kde l_0 je délka vodiče při počáteční teplotě ϑ_0 (m)

α je koeficient teplotní roztažnosti ($1/^{\circ}\text{C}$)

Prodlužováním vodiče se zvětšuje jeho průhyb a naopak se zmenšuje mechanické napětí ve vodiči σ_H a tím dojde k pružnému zkrácení vodiče

$$\Delta l_{\sigma} = \frac{l_0}{E} \cdot \Delta \sigma_H = \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) , \quad (6.60)$$

kde σ_H je mechanické napětí (MPa)

E je modul pružnosti materiálu (MPa)

Celková změna délky vodiče je rovna

$$\Delta l = \Delta l_{\vartheta} - \Delta l_{\sigma} = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) . \quad (6.61)$$

Délka vodiče při teplotách ϑ_0 a ϑ_1 je dána vztahem pro skutečnou délku vodiče z rovnice paraboly jako

$$l_0 = a + \frac{a^3}{24 \cdot c_0^2} ; \quad l_1 = a + \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} . \quad (6.62)$$

Prodloužení vodiče získáme pouhým rozdílem těchto hodnot

$$\Delta l = l_1 - l_0 = \frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} - \frac{a^3}{24 \cdot c_0^2} . \quad (6.63)$$

Srovnáním vztahů 6.61 a 6.63 dostaneme rovnici

$$\frac{a^3}{24 \cdot c_1^2} - \frac{a^3}{24 \cdot c_0^2} = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) . \quad (6.64)$$

Náhradou parametru c ekvivalentním vztahem bude tato rovnice ve tvaru

$$\frac{a^3 \cdot (\gamma \cdot z_1)^2}{24 \cdot \sigma_{H1}^2} - \frac{a^3 \cdot (\gamma \cdot z_0)^2}{24 \cdot \sigma_{H0}^2} = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) . \quad (6.65)$$

Pokud budeme uvažovat parabolické nahrazení křivky, můžeme zavést zjednodušující podmínku že $l_0 \cong a$, tak platí

$$\frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_1)^2}{24 \cdot \sigma_{H1}^2} - \frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_0)^2}{24 \cdot \sigma_{H0}^2} = \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) . \quad (6.66)$$

Tuto rovnici vynásobíme výrazem $E \cdot \sigma_{H1}^2$ pak dostaneme

$$E \cdot \frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_1)^2}{24} - \frac{a^2 \cdot (\gamma \cdot z_0)^2}{24 \cdot \sigma_{H0}^2} \cdot E \cdot \sigma_{H1}^2 = \alpha \cdot E \cdot \sigma_{H1}^2 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \sigma_{H1}^2 \cdot (\sigma_{H1} - \sigma_{H0})$$

$$\sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \cdot \left[\frac{\gamma^2 \cdot E}{24} \cdot \left(\frac{a \cdot z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + \alpha \cdot E \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] = \frac{\gamma^2 \cdot E}{24} \cdot (a \cdot z_1)^2 \quad (6.67)$$

Kde α , γ a E jsou konstanty pro daný vodič, takže rovnici můžeme ještě upravit na tvar

$$\sigma_{H1}^3 + \sigma_{H1}^2 \cdot \left[A \cdot \left(\frac{a \cdot z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2 + B \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] = A \cdot (a \cdot z_1)^2, \quad (6.68)$$

kde $A = \frac{\gamma^2 \cdot E}{24}$

$$B = \alpha \cdot E$$

Uvedený tvar rovnice vede ke zjednodušení praktických výpočtů při sestavování montážních tabulek. Pomocí stavové rovnice se určují dva důležité údaje pro návrh a montáž vedení. Těmito údaji jsou kritické rozpětí a kritická teplota.

6.4.2 Kritické rozpětí

Dle [22] platí tyto informace. Změnou teploty se mění mechanické napětí ve vodiči. S klesající teplotou se vodič zkracuje a naopak v něm roste mechanické napětí. V některých případech může být ve vodiči při nižších teplotách větší mechanické napětí jako ve vodiči při -5°C a přetížení. Proto se určuje tzv. kritické rozpětí, při kterém je mechanické napětí stejné jako při teplotě -5°C a přetížení. Parametrem tohoto rozpětí je teplota, která se zpravidla určí jako -30°C , při které je hodnota kritického rozpětí maximální. Pro rozmístění stožárů to znamená, že žádné rozpětí nesmí být menší jako kritické. To proto, že při určité teplotě by se zvýšilo mechanické napětí nad dovolenou hodnotu.

Kritické rozpětí určíme ze stavové rovnice, pokud platí

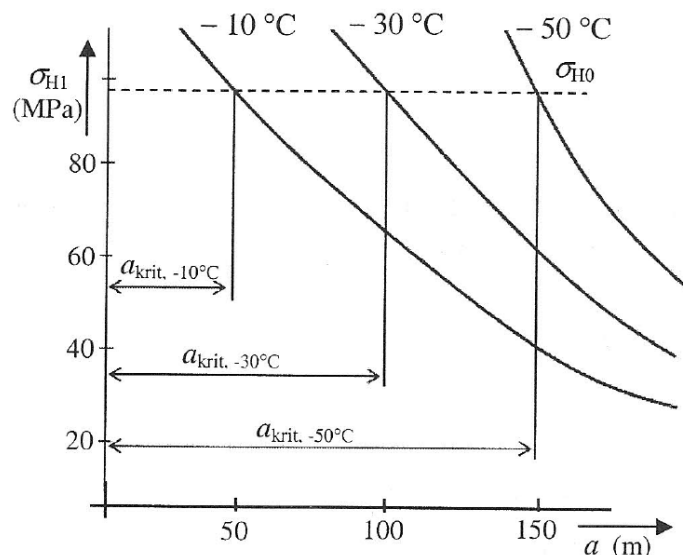
$$\sigma_{H1} = \sigma_{H0} ; \quad \vartheta_0 = -5^\circ\text{C} ; \quad z_1 = 1$$

Po dosazení těchto předpokladů a úpravě dostáváme ze stavové rovnice hodnotu kritického rozpětí ve tvaru

$$a = a_{krit} = \frac{\sigma_{H0}}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot [-(\vartheta_1 + 5)]}{z_0^2 - 1}} \quad (6.69)$$

a pro teplotu $\vartheta_1 = -30^\circ\text{C}$

$$a_{krit} = \frac{10 \cdot \sigma_{H0}}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot \alpha}{z_0^2 - 1}}. \quad (6.70)$$



Obr. 19 - Kritické rozpětí [22]

Z této rovnice je viditelný fakt, že při nižší teplotě je kritické rozpětí vyšší. Při pohledu na obr. 19 [22] je vidět, že při větším rozpětí než je rozpětí kritické, je mechanické napětí při zvolené teplotě menší než při $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetížení. Naopak pro rozpětí, které je menší než kritické, bude ve vodiči větší mechanické napětí než při teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetížení. To jen dosvědčuje fakt, že rozpětí na vedení musí být vyšší než kritické rozpětí.

6.4.3 Kritická teplota

Dle [22] platí následující. Kritická teplota je definována jako teplota, při které je průhyb vodiče stejný jako při $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetížení. Je stejně důležitá při výstavbě a návrhu vedení jako kritické rozpětí. Je požadováno, aby vodič v nejméně příznivém případě bezporuchového stavu ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetížení, respektive $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo ve speciálních případech (např. nerovnoměrná námraza) nezasáhl ochranných pásem okolních objektů či země. Proto se stanovuje kritická teplota.

Jak již bylo řečeno, tak průhyb vodiče při kritické teplotě je stejný jako při $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetížení. Z této definice plyne, že prodloužení vodiče vlivem teploty bude stejné, jako pružné zkrácení vlivem zmenšení mechanického napětí. Platí tedy

$$\Delta l_{\vartheta} = \Delta l_{\sigma} ,$$

Za předpokladu

$$\vartheta_1 = \vartheta_{krit} ; \quad \vartheta_0 = -5\text{ }^{\circ}\text{C} ; \quad \sigma_{H1} = \sigma_{Hkrit} ; \quad z_1 = 1 .$$

Pro prodloužení vodiče a zkrácení vodiče platí vztahy

$$\Delta l_{\vartheta} = l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) , \quad (6.71)$$

$$\Delta l_{\sigma} = \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{H1}) . \quad (6.72)$$

Při respektování definice kritické teploty a daných předpokladů platí

$$l_0 \cdot \alpha \cdot (\vartheta_{krit} - \vartheta_0) = \frac{l_0}{E} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{Hkrit}) \quad , \quad (6.73)$$

$$\vartheta_{krit} = \frac{1}{E \cdot \alpha} \cdot (\sigma_{H0} - \sigma_{Hkrit}) - 5 \quad . \quad (6.74)$$

Výpočtem mechanického napětí pro kritickou teplotu dle vztahu

$$\sigma_{Hkrit} = \frac{\sigma_{H0}}{z_0} \quad . \quad (6.75)$$

Dosazením do vztahu pro výpočet kritické teploty dostaneme vztah ve tvaru

$$\vartheta_{krit} = \frac{1}{E \cdot \alpha} \cdot \left(\sigma_{H0} - \frac{\sigma_{H0}}{z_0} \right) - 5 = \frac{\sigma_{H0}}{E \cdot \alpha} \cdot \left(\frac{z_0 - 1}{z_0} \right) - 5 \quad . \quad (6.76)$$

Z tohoto vztahu plyne skutečnost, že kritická teplota není závislá na délce rozpětí. Musíme ji však porovnat s teplotou +80 °C a mohou nastat tyto případy:

- $\vartheta_{krit} > +80 \text{ °C}$ maximální průhyb nastává při -5 °C a přetížení
- $\vartheta_{krit} = +80 \text{ °C}$ maximální průhyb při -5 °C a přetížení je stejný jako při +80 °C
- $\vartheta_{krit} < +80 \text{ °C}$ maximální průhyb nastává při +80 °C

Tyto poznatky jsou důležité při projektování venkovního vedení. Je nutné vědět, při které podmínce nastane maximální průhyb a následně pro tento průhyb ověřit bezpečné vzdálenosti od okolí.

6.5 Nesymetrické stavy na vedení

Nesymetrickými stavy na vedení se zabývá literatura [22], ze které jsou čerpány následující informace. Kromě symetrických stavů je důležité se zabývat taky stavy nesymetrickými. Nesymetrické vztahy jsou způsobeny rozdílným mechanickým napětím v jednotlivých rozpětí kotevního úseku. Symetrický stav znamená, že je ve všech rozpětí stejná horizontální složka mechanického napětí a izolátory se nachází ve svislé poloze. Tento stav nastane při -5 °C a přetížení nebo při kritické teplotě. V těchto podmínkách je vodič natažen na stejné mechanické napětí v každém rozpětí kotevního úseku.

V ostatních případech se jedná o stav nesymetrický. U těchto stavů dochází z důvodu rozdílných horizontálních složek mechanických napětí v sousedních rozpětí k vychýlování izolátorových závěsů z rovnovážné polohy. K těmto stavům dochází nejvíce při nerovnoměrné námraze nebo přetrhnutí vodiče. Nerovnoměrná námraza na vedení znamená takovou situaci, kdy se na jednom rozpětí objeví námraza ve větší míře než na ostatních rozpětích. V tomto poli dojde k největšímu průhybu vedení a izolátory se vykloní z rovnovážné polohy směrem k tomuto rozpětí. Následkem námrazy bude v postiženém rozpětí také větší mechanické napětí než v okolních. Mechanické napětí se bude postupně snižovat směrem od postiženého rozpětí. Nejméně příznivý případ nerovnoměrné námrazy vznikne, pokud námraza vznikne jen v křižovatkovém poli.

K přetržení vodiče může mimo jiné dojít při mechanickém poškození nebo vytažení vodiče ze spojky. V případě přetržení vodiče nastává na vedení poruchový stav. Přetržení vodiče způsobuje velké rozdíly mezi horizontálními tahy jednotlivých rozpětí. Stožáry jsou po přetržení namáhány kromě vertikálních sil (tíha vodičů), také silami horizontálními, které mohou stožár poškodit. Mimo tyto situace se může vodič po přetržení nebezpečně přiblížit ke křížovaným objektům a ohrozit tak bezpečnost okolí. To se týká zejména rozpětí sousedícího s poškozeným úsekem, kde dojde k podstatnému snížení mechanického napětí ve vodiči.

6.5.1 Určení tíhového rozpětí

Na každý stožár působí vertikální tah, který je daný tíhou vodiče dané délky a přídatným zatížením (pokud se v daném případě vyskytuje). Tíhovým rozpětím nazýváme maximální délku vodiče, která může působit na stožár. Pokud zvětšíme tíhové rozpětí, tak se zvětší také vertikální zatížení stožáru. Pro ideální variantu, kdy jsou závěsné body ve stejné výšce, definujeme tíhové rozpětí $a_{tíha}$, jako součet polovin délek těchto sousedních rozpětí. Zapsáno vztahem

$$a_{tíha} = \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{2} = \frac{1}{2} \cdot (a_1 + a_2) , \quad (6.77)$$

kde a_1, a_2 jsou délky sousedních rozpětí (m)

Při různých výškách závěsných bodů určujeme tíhové rozpětí následujícím způsobem. Vertikální složka síly působící na stožár je daná výrazem

$$F_V = \frac{1}{2} \cdot (a_1 + a_2) \cdot (q_1 + q_2) \pm F_{H0} \cdot \left(\frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right) . \quad (6.78)$$

Po vydělení výrazem $(q_1 + q_2)$ a dalších úpravách dostáváme vztah pro délku tíhového rozpětí ve tvaru

$$a_{tíha} = \frac{1}{2} \cdot (a_1 + a_2) \pm c \cdot \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{a_i} , \quad (6.79)$$

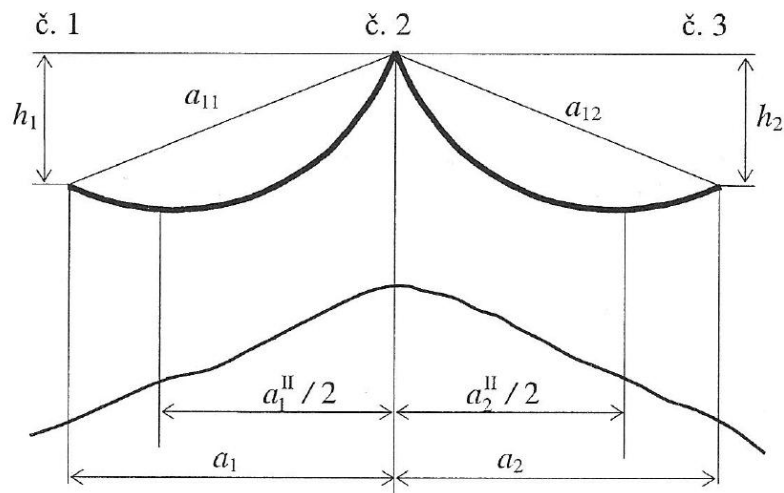
kde h_i je výškový rozdíl sousedních závěsů (m)

a_i je délka daného rozpětí

Znaménko + nebo - volíme dle toho v jakém vztahu (poloze) jsou závěsné body. Pokud na závěs působí silou směrem dolů (tíhovou), bude znaménko kladné. Pokud na závěs působí naopak silou zdvihací, bude znaménko záporné.

Pro názornost uvedu vztah pro výpočet tíhového rozpětí na obr. 20 [22].

$$a_{tíha} = \frac{1}{2} \cdot (a_1^{\text{II}} + a_2^{\text{II}}) = \frac{1}{2} \cdot (a_1 + a_2) + c \cdot \left(\frac{h_1}{a_1} + \frac{h_2}{a_2} \right) . \quad (6.80)$$



Obr. 20 - Určení tíhového rozpětí [22]

Při rozmísťování stožárů musí platit, že všechny tíhové rozpětí musí být menší maximálně rovny zadanému rozpětí. Je důležité dávat pozor na stožáry uložené v dolinách, blízkosti vrcholu průhybové křivky, aby výslednice sil působící na závěs nezměnila svůj směr a nevznikl problém utopených stožárů.

7 Návrh úseku vedení

Součástí této bakalářské práce je samotný návrh dvou kotevních úseků vybrané varianty řešení. V jednotlivých kapitolách rozeberu jednotlivé fáze a části návrhu. Nejprve představím samotný projekt a objasním, za jakým účelem by mělo dojít k výstavbě úseku vedení. Poté přejdu k samotnému návrhu uvažovaných tras vedení a dílčích prvků jako jsou vodiče a stožáry. Na tyto kapitoly naváže podélný profil dvou kotevních úseků vedení a s ním související projekční tabulky těchto úseků. Podklady pro tuto práci vznikly za spolupráce se společností ČEPS Invest, a.s. Tato společnost je dceřinou společností ČEPS, jejíž předmětem činnosti je zajištění technického a projektového řešení staveb přenosové soustavy ČR.

7.1 Výběr lokality

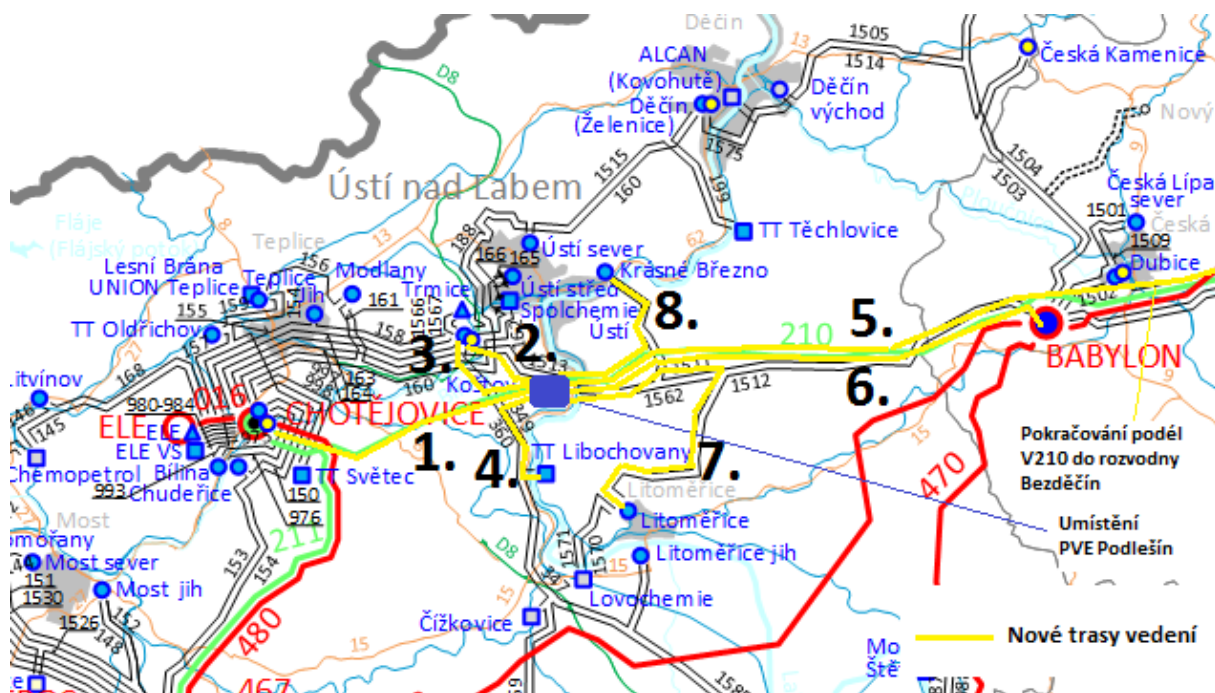
Jako demonstrační lokalita je zvolena oblast severních Čech, konkrétně město Ústí nad Labem. Jedná se o velmi zajímavou oblast z hlediska složení své zdrojové základny. V této oblasti je velice rozmanité složení výrobních zdrojů elektrické energie. Mimo jiné samotný Ústecký kraj aktuálně disponuje nejvyšším instalovaným výkonem VTE v rámci jednotlivých krajů. Kromě své zdrojové základny je lokalita specifická také množstvím rozveden přenosové soustavy.

V okolí Ústí nad Labem je instalováno velké množství OZE. K tomuto množství obnovitelných zdrojů energie je nutné zajistit výkon potřebný pro pokrytí dodávky elektrické energie při nevýhodných klimatických podmínkách. Provozovatel přenosové sítě (společnost ČEPS) je smluvně zavázán zajistit kvalitu a spolehlivost dodávky elektrické energie. To znamená, že je povinen udržovat hodnotu napětí a frekvence na hodnotách daných kodexem [30]. Je nutné udržet rovnováhu mezi spotřebou a výrobou elektrické energie. S neustále se zvyšujícím počtem/podílem rozptýlené výroby tvořené OZE může růst požadavek na uplatňování zdrojů nabízející tzv. podpůrné služeb (PpS). Tyto zdroje zajišťují dodávku elektrické energie v situacích, kdy to řízení soustavy vyžaduje, například právě při nečekaném poklesu výroby OZE [31]. Vzhledem k poloze města a přítomnosti řeky Labe je tato lokalita vhodná k umístění přečerpávací vodní elektrárny (PVE). Uvažujeme proto hypoteticky vybudování PVE v jižní části města Ústí nad Labem o výkonu 400 MVA s pracovním názvem PVE Podlešín.

Na základě důkladného rozboru elektrizační sítě byla společností EGÚ Brno, a.s. zpracována analýza volné kapacity sítí v elektrizační soustavě České republiky, která poukázala na některé nedostatky. Rostoucí zájem investorů o vybudování nových obnovitelných zdrojů a následné připojení k distribuční síti způsobil, že je v mnoha oblastech kapacita pro připojení nových zdrojů zcela vyčerpána. Obecně je z hlediska možností vybudování nových zdrojů elektrické energie oblast severních Čech již na svém maximu. V této oblasti tak není možné za stávajících podmínek připojovat další nové zdroje bez dalších investic a úprav [5]. Bude-li se zvažovat vybudování PVE pro poskytnutí podpůrných služeb v okolí Ústí nad Labem, je nezbytné provést aktuální rozbor sítí.

7.2 Varianty vyvedení výkonu

Rozbor sítí v okolí Ústí nad Labem byl proveden a je shrnut v kapitolách o elektrizační soustavě konkrétně region severní Čechy - současný stav a výhled do budoucna. Na základě analýzy dané oblasti byly vypracovány možné varianty vyvedení výkonu PVE do sítě. Následující obrázek (obr. 21 [11]) ukazuje umístění PVE Podlešín a ilustruje navržené varianty připojení do elektrizační soustavy.



Obr. 21 - Varianty vyvedení výkonu PVE (modifikováno z [11])

Jednotlivé varianty jsou členěny na varianty vedoucí směrem na západ a na východ od PVE. Detailní slovní popis variant je uveden níže. Tyto varianty vychází z předpokladu zrušení 220 kV linky V210 a její náhradou vedením 400 kV.

7.2.1 Vyvedení výkonu směrem na západ

Varianta 1: Vedení V210 vede do rozvodny Chotějovice. Možnost využít tuto trasu (cca 19 km). Jelikož se zde vedení už nachází, nestojí v cestě žádná zástavba nebo chráněné území.

Varianta 2: Vybudování nového vedení vedle V1513 do rozvodny Koštov. Výstavba asi 5 km nového vedení. Realizaci nestojí v cestě zástavba ani chráněná území. V rozvodně Koštov je v současné době volná kapacita 16 MVA, což by vyžadovalo investici do rozšíření rozvodny.

Varianta 3: Vyústění výkonu opět do rozvodny Koštov. Využití rušeného vedení V210 v délce cca 3 km a prudké odbočení na sever podél linek V349 a V360 do rozvodny Koštov. Vybudování 3,5 km zcela nového vedení. Realizaci nestojí v cestě zástavba ani chráněná území.

Varianta 4: Vyvedení do rozvodny Libochovany (jih). Opět možnost využití trasy rušené linky V210 o délce 3 km a prudké odbočení na jih podél linek V349 a V360. Tyto linky 110 kV jsou již bohužel dvojité, a proto by byla nutná výstavba nového vedení o celkové délce 6,5 km. Jelikož vedení vede podél již stávajících linek, tak není problém z hlediska zástavby nebo chráněného území. Volná kapacita v rozvodně Libochovany činí 30 MVA (investice do rozšíření rozvodny).

7.2.2 Vyvedení výkonu směrem na východ

Varianta 5: Vedení V210 vede do rozvodny Bezděčín. Možnost využití trasy vedení (asi 80 km).

Varianta 6: Vedení V210 těsně míjí rozvodnu Babylon. Připadá v úvahu odbočka do této rozvodny. Využilo by se asi 30 km trasy a poté nutná výstavba 2 km nové odbočky do rozvodny Babylon. Tato odbočka by vedla paralelně s linkou V450 (400 kV) a nebrání jí zástavba nebo chráněné území.

Varianta 7: Vyvedení směrem na jih (rozvodna Litoměřice sever) je komplikovaná z hlediska výskytu CHKO České středohoří a četných přírodních památek tímto směrem.

Varianta 8: Využití části trasy vedení V210 6,5 km a následně odbočení doleva (směrem na sever) a vybudování nového vedení podél dvojité linky V1513 a V1511 o délce cca 9 km. Vzhledem k existenci těchto dvou vedení není problém se zástavbou. Nevýhodou této možnosti je častá změna směru vedení. Volná kapacita v rozvodně je 28 MVA (investice do rozšíření rozvodny).

7.2.3 Výsledná varianta

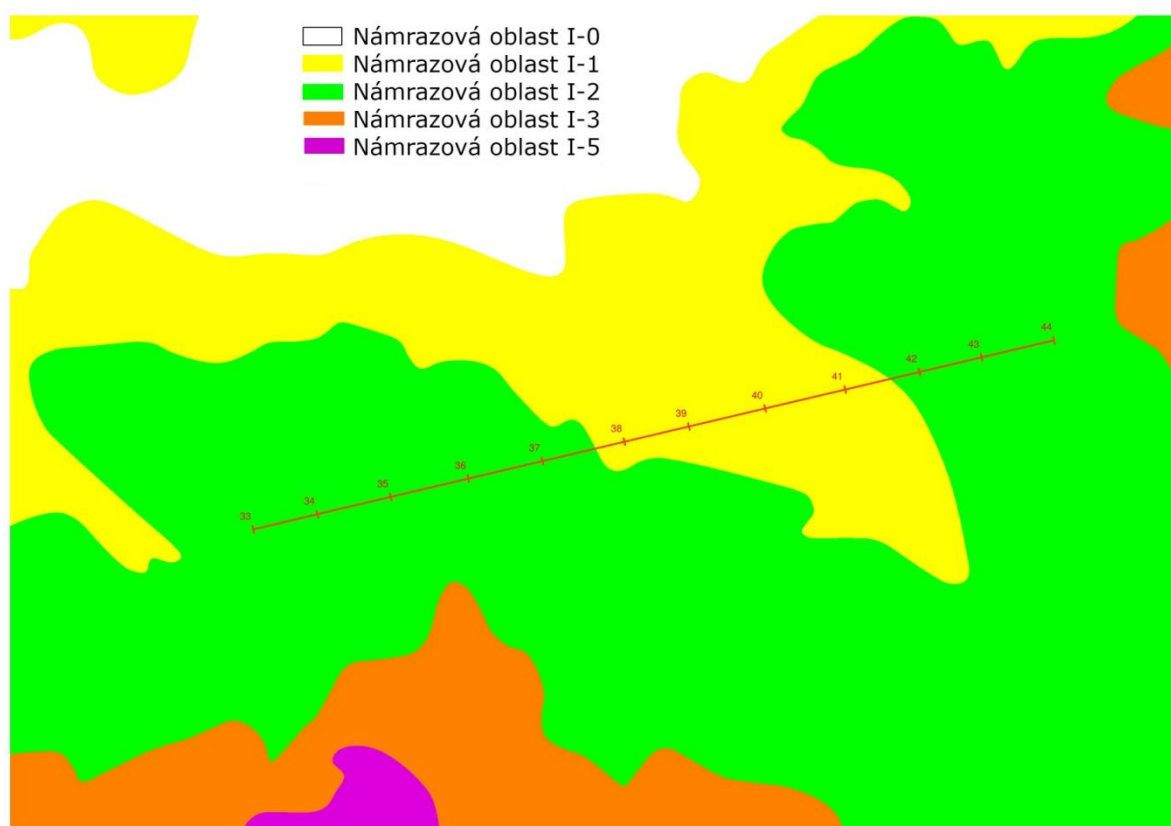
Vzhledem k možnostem rozdělení výkonu do více částí, je vhodné zkombinovat varianty z obou skupin. Nejlépe se jeví varianta vyvedení výkonu do rozvodny Chotějovice a Babylon. Což obnáší přebudování rušené linky V210 do obou směrů a vybudování krátké asi 2 km dlouhé odbočky do rozvodny Babylon. Tyto rozvodny jsou výhodné z hlediska své kapacity a napěťové úrovně (vyvedení výkonu do přenosové sítě).

Možnosti připojení výkonu do distribuční sítě (110 kV) nejsou vhodné z hlediska zkratových poměrů v síti. V současné době není ani v této síti dostatečná kapacita k připojení tak velkého zdroje bez výrazných investic. Vyvedení výkonu na napěťové hladině 220 kV není ideální z hlediska výhledu této úrovně do budoucna. Jak bylo uvedeno v kapitole o výhledu elektrizační soustavy, tak dle OTE a Strategického plánu společnosti ČEPS je naplánován postupný přechod této úrovně na napětí 400 kV.

7.3 Popis vybraných úseků vedení

Vedení prochází oblastí s náročnými klimatickými podmínkami. Křížuje oblasti s častým výskytem námrazy a to až oblasti I-8. Pro lepší dokreslení rozdílů vlastností vedení v různých atmosférických podmínkách, jsme zvolili návrh dvou kotevních úseků v různých námrazových oblastech.

První úsek vedení se nachází zhruba 10 km od rozvodny Chotějovice mezi obcemi Žalany a Habrovany. Tato část vedení leží mezi stožáry č.33 až č.44 (značení původní linky). Tento kotevní úsek je dlouhý 4 030 m s převýšením přibližně 84 m. Nachází se v námrazové oblasti I-2 a větrné oblasti III s průměrnou rychlostí větru 27,5 m/s. Umístění úseku v námrazové oblasti dokresluje následující obrázek. Značíme ho jako kotevní úsek mezi stožáry č.1.1 - 1.12.

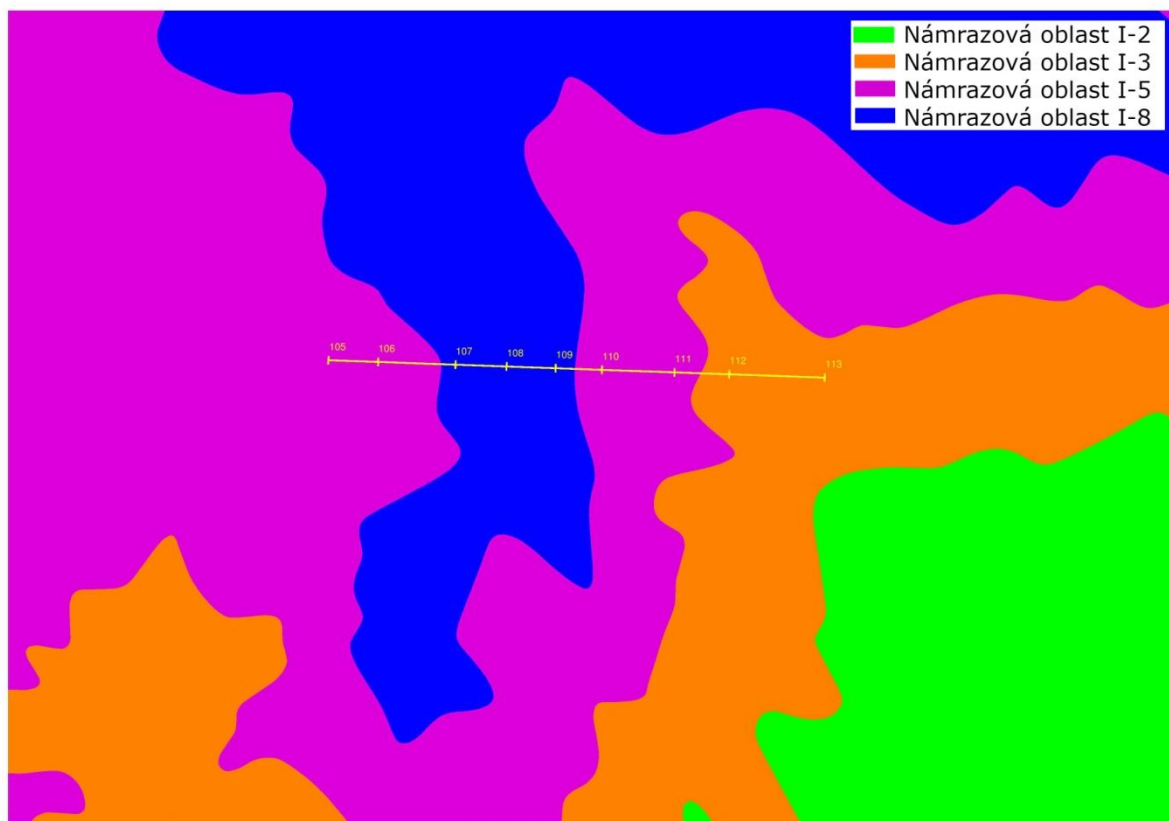


Obr. 22 - Výskyt námrazy na 1. úseku

Druhý úsek vedení se nachází zhruba 10 km od rozvodny Babylon mezi obcemi Levínské Petrovice a Brusovem. Tato část vedení leží mezi stožáry č.105 až č.113 (značení původní linky). Tento kotevní úsek je dlouhý 2 432 m s převýšením asi 192 m. Nachází se v námrazové oblasti I-8 a větrné oblasti III s průměrnou rychlostí větru 27,5 m/s. V některých místech leží také toto vedení v námrazové oblasti. Umístění úseku v námrazové oblasti znázorňuje obr. 23. Tuto část značíme jako kotevní úsek mezi stožáry č.2.1 - 2.11.

Pro výpočet vedení při zatížení námrazou je rozhodující nejvyšší námrazová oblast, kterou trasa vedení protíná. To znamená, že pokud vedení leží svou částí například v námrazové

oblasti I-8, tak tato oblast platí pro celý kotevní úsek. Proto jsme při výpočtu úseku č. 2 uvažovali námrazovou oblast I-8, i když výrazně zasahuje do oblastí I-5 a I-3.



Obr. 23 - Výskyt námrazy na 2. úseku

7.4 Vodiče a stožáry

Pro návrh výše popsaných dvou kotevních úseků jsme vybrali typ instalovaných lan a stožáry. Stožáry jsme zvolili typu Dunaj. Pro dané úseky jsme využili různé výšky nosných stožárů typu Dunaj 2012 - N. Od základní výšky (46 m. - rozměr od paty stožáru po nejvyšší bod) po navýšení +2, +4 a +6 metrů. Těchto navýšení stožárů jsme využívali, abychom průhybem vedení v jednotlivých rozpětí neporušili předpisy o bezpečné vzdálenosti vedení od okolí daných normou. Pro kotevní stožáry byl zvolen typ Dunaj 2012 - RV170. Výkresy stožárů jsou uvedeny v příloze (příloha C - nosný stožár; příloha D - kotevní stožár).

Jako typ vodiče jsme zvolili AlFe lano typu 490-AL1/64-ST1A, které je nejčastěji využíváno pro vodiče v přenosové soustavě. Pro toto lano platí proudová zatížitelnost 815 A [32], což při uvažování trojsvazku činí přibližně 2,5 kA. Tato proudová zatížitelnost je stanovena pro vodič při teplotě 80 °C. Jak lze vyčíst z označení lana tak duše je tvořena z pozinkovaných ocelových drátů s průřezem přibližně 64 mm². Plášť je vyroben z tří vrstev hliníkových drátů o celkovém průřezu 490 mm². Celkový průměr lana je 30,6 mm s průřezem 553,8 mm² a hmotností s mazivem 1,87 kg/m. Bližší údaje o tomto lanu jsou uvedeny v příloze E.

7.5 Návrh dvou kotevních úseků vedení

Při návrhu dvou kotevních úseků jsem úzce spolupracoval se společností ČEPS Invest, která mi poskytla software pro sestavení projekčních tabulek a podélného profilu vedení. Při návrhu jsme nejprve do zaměřeného podélného profilu daného úseku vykreslili čáru ležící 12 m nad zemí znázorňující hranici, která respektuje nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.

Zvolením referenčního tahu jsme získali parametr řetězovky pro vodič o teplotě 80 °C. Tento parametr jsme použili pro vykreslení křivky do podélného profilu. Teplota 80 °C je normou nejvyšší povolená teplota pro AlFe lana. Při této teplotě je vodič nejdelší a jeho průhyb v jednotlivých rozpětích je tak největší. Proto jsme do podélného profilu zakreslili právě průhyb vodiče při této teplotě. Nabízelo by se průhyb zmenšit tím, že zvýšíme referenční tah vodiče. Ovšem nemůžeme ho zvýšit natolik, aby při kombinaci extrémního zatížení námrazou a větrem (nejhorší možné podmínky z hlediska zatížení vodiče) nepřekročil 55 % RTS. Pro mezní stav použitelnosti vodiče platí podmínka, že tah vodiče, v kterémkoliv místě rozpětí při návrhových zatížení, které odpovídají zatěžovacím stavům odpovídajícím úrovni spolehlivosti 1, nesmí překročit hranici 55 % matematické pevnosti pro vodiče na bázi hliníku (55 % RTS).

Proto je důležité zvolit správný referenční tah, jak z pohledu průhybu vedení, tak i vzhledem k zatížení vodiče. Za referenční považujeme hodnoty při teplotě -5 °C a bez přídavného zatížení.

7.5.1 Kotevní úsek mezi stožáry č.1.1 - 1.12

Projekční tabulka tohoto úseku je přiložena v příloze F. Jak již bylo zmíněno, tak tento úsek leží v námrazové oblasti I-2. Pro délku 4 030 m bylo navrženo celkem 12 stožárů, tedy 11 rozpětí. Střední délka rozpětí L_R byla spočítána na 370,3 m. Zvolili jsme referenční tah t o velikosti 32 kN. Z toho plyne, že při použití vodiče s průřezem 553,83 mm², je referenční mechanické napětí $\sigma = 57,78$ MPa. Parametr řetězovky c , pro vytvoření podélného profilu vedení, jsme vypočítali jako 1 315 m. Největšího maximálního průhybu jsme dosáhli na v pořadí pátém rozpětí, kdy bylo 16,25 m. Abychom splnili minimální výšku 12 m nad terénem, tak jsme byli nuceni navýšit oba krajní stožáry o 4 m. Při teplotě -5 °C a kombinovaném zatížení extrémní námrazou a větrem jsme dosáhli hodnoty tahu ve vodiči $t = 65,91$ kN a přídavné zatížení vodiče $z = 2,513$. Lze vidět, že podmínku pro pevnost vodiče (55 % RTS) jsme splnili.

7.5.2 Kotevní úsek mezi stožáry č.2.1 - 2.11

Projekční tabulka tohoto úseku je přiložena v příloze G. Tento kotevní úsek leží v námrazové oblasti I-8. Při jeho délce 2 432 m bylo navrženo celkem 11 stožárů, tedy 10 rozpětí. Střední délka rozpětí L_R byla vypočítána na 248,7 m. Zvolením referenčního tahu t o velikosti 13 kN, jsme, při průřezu vodiče $S = 553,83$ mm², dostali referenční mechanické napětí σ

o hodnotě 23,47 MPa. Parametr řetězovky c při 80 °C pro vytvoření podélného profilu vedení jsme vypočítali jako 620 m. Největšího průhybu vodiče jsme dosáhli na v pořadí desátém rozpětí. Maximální průhyb f_{max} je v tomto rozpětí 19,36 m. Pro splnění minimální výšky 12 m nad terénem, jsme navýšili oba krajní stožáry o 4 m. Pro teplotu -5 °C a současné působení extrémní námrazy a větru jsme vypočítali hodnotu maximálního tahu $t = 71,81$ kN a přídatného zatížení vodiče $z = 6,323$.

7.5.3 Srovnání navržených kotevních úseků

Porovnáním těchto dvou navržených kotevních úseků získáme lepší přehled, jak se liší návrh vedení v různých námrazových oblastech. Vzájemné srovnání je pro přehlednost uvedeno v tab. 9. První úsek vedení (v námr. o. I-2) má střední délku rozpětí 370,3 m oproti 248,7 m druhého úseku (v námr. o. I-8). Obecně platí pravidlo, že se zvyšující se námrazou se stožáry vzájemně přibližují a zkracují se tak jednotlivá rozpětí.

Tab. 9 - Srovnání navržených kotevních úseků

Sledovaný parametr	Úsek č.1.1 - 1.12	Úsek č.2.1 - 2.11
Námrazová oblast	I-2	I-8
Referenční tah t (kN)	32	13
Referenční mechanické napětí σ (MPa)	57,78	23,47
Střední rozpětí L_R (m)	370,3	248,7
Parametr řetězovky c při teplotě 80 °C a bez zatížení (m)	1315	620
Přídavné zatížení vodiče z při -5 °C a kombinovaném zatížení extrémní námrazou a větrem (-)	2,513	6,323
Tah ve vodiči t při -5 °C a kombinovaném zatížení extrémní námrazou a větrem (kN)	65,91	71,81
Mechanické napětí ve vodiči σ při -5 °C a kombinovaném zatížení extrémní námrazou a větrem (MPa)	119	129,67

U prvního úseku jsme si mohli díky nižší námrazové oblasti dovolit vyšší referenční tah, abychom měli menší jednotlivé průhyby vedení a nemuseli, tak navyšovat stožáry do výšky. Zároveň jsme však pro nejhorší možný případ (-5 °C a kombinované zatížení extrémní námrazou a větrem) nepřekročili hodnotu 55 % jmenovité pevnosti v tahu vodiče. Naopak u druhého úseku jsme museli zvolit nižší referenční tah, abychom nepřekročili 55 % RTS. To se nám projeví na větším průhybu jednotlivých rozpětí.

Význam působení námrazy a větru lze vidět na rozdílu přídatných zatížení vodiče. U prvního úseku se vlivem námrazy a větru zvýší zatížení zhruba dvaapůlkrát oproti stavu bez působení těchto vlivů. Na druhém úseku je tento rozdíl ještě mnohem vyšší. Působením námrazy a větru se zatížení zvýší přibližně šestkrát oproti stavu bez přídatného zatížení.

7.6 Podélné profily úseků

Vedle vytvoření projekčních tabulek byly vytvořeny také podélné profily. Jednotlivé profily se nachází v příloze H respektive I. Podélný profil úseků vedení slouží pro kontrolu minimálních vzdáleností vodičů od země a okolních objektů. Pro tyto vzdálenosti platí pravidla, která byla zmíněna výše v této práci (kap. 4.5 Bezpečné vzdálenosti vedení od okolí). Profil vznikl zaměřením terénu. Charakterizuje výškový profil terénu. Ve spodní části tohoto profilu je vyobrazen půdorys zaměřovaného úseku krajiny. Tento půdorys slouží ke správnému umístění stožárů tak, aby bylo z profilu jasně viditelné, že stožáry nevadí v okolní krajině. Především se tak problémům s umístěním stožáru v pozemní komunikaci nebo ohrožení vodovodního potrubí.

Vynesení křivky profilu do 12 m nad zemi je zajištěno splnění nařízení vlády o ochraně před neionizujícím zářením. Splnění těchto hygienických limitů jsou v naprosté většině případů zajištěny také minimální bezpečné vzdálenosti od země a okolních objektů dané normou. Po intuitivním rozmístění stožáru se do profilu umístí průhybová křivka s parametrem c při teplotě 80 °C. Poté se zkontroluje, jestli křivka nikde nezasahuje pod křivku 12 m nad terénem. Pokud ano, tak je více možností, jak tomu zabránit. První je manipulace s polohou stožáru tak, aby se tyto křivky nekřížily. Druhá možnost je zvýšení výšky stožárů v normované řadě (po dvou metrech). Tato varianta s sebou ovšem přináší komplikaci v tom, že se při návrhu vedení snažíme co nejméně ničit vzhled krajiny. K této možnosti se sahá až v krajním případě. Poslední variantou je změna referenčního tahu vodiče, tím dojde ke zmenšení průhybů. Při zvětšení referenčního tahu je nutné si hlídat podmínku pro jmenovitou pevnost v tahu vodiče (55 % RTS).

Kromě zakreslování křivky při teplotě +80 °C, se zakresluje také průhyb vodičů pro námrazek jen v poli křižovatky – tzn. že omrzne pouze vodič v daném rozpětí a okolní rozpětí jsou bez námrazy. U lehkých námrazových oblastí (např. I2) tento parametr vychází blízko k parametru pro teplotu +80 °C. V těžkých námrazových oblastech je tento rozdíl podstatný – např. poloviční. Tato situace však z hlediska rozsahu práce nebyla uvažována.

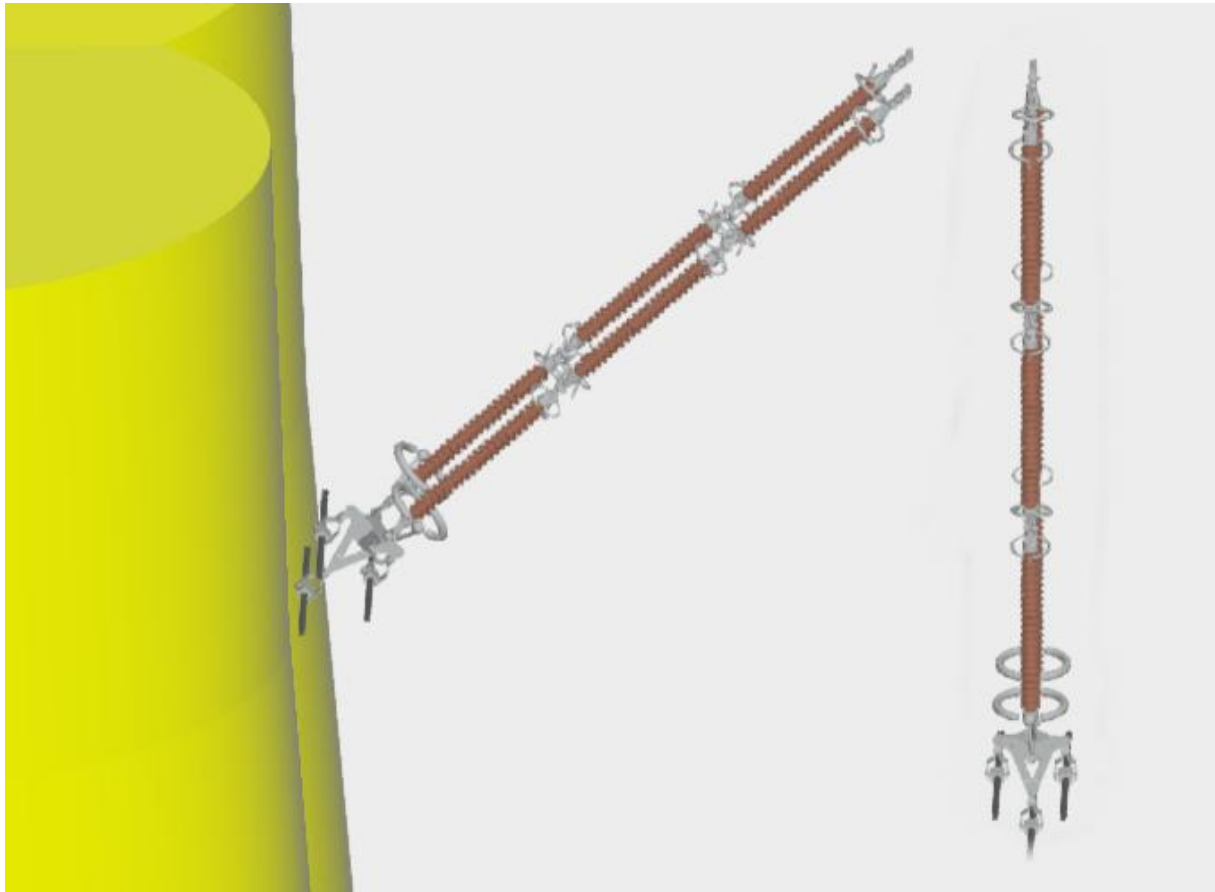
7.7 Vychýlení izolátorů

Pro bezpečný provoz vedení je nutné, aby nenastala situace, kdy by mohla být porušena bezpečná vzdálenost vodiče od konstrukce. K této situaci může dojít při působení větru na izolátorový závěs. Kdy se závěs nebezpečně vykloní a poruší tak izolační vzdálenost, která je stanovena normou jako minimální elektrická vzdálenost pro jednotlivá napětí.

V praxi se kontrolují vzdálenosti vychýlení izolátorových závěsů pro dvě rychlosti větru (jmenovitou a extrémní). Toto vychýlení dále závisí na poměru větrového a tíhového rozpětí. Platí vztah, že čím větší je větrové rozpětí oproti tíhovému, tím větší vychází toto vychýlení. Pakliže tato kontrola nevyjde, jedná se o tzv. utopené stožáry a musí dojít k posunu stožáru,

navýšení jeho výšky nebo použití přídavných závaží, ale toto opatření má jen malý vliv a u nových vedení se téměř nepoužívá.

V našem případě jsou tato vychýlení v pořádku. Pro případ druhého úseku jsem sestrojil model izolátoru a daného vychýlení. Na základě tohoto modelu bylo zjištěno, že v našem případě nebyla porušena bezpečná vzdálenost vodičů od stožárů.



Obr. 24 - Vychýlení izolátoru

Na obr. 24 jsou znázorněny izolátory v zavěšení při referenčních podmínkách a při vychýlení následkem působení větru. Žlutá oblast znázorňuje minimální bezpečnou vzdálenost od stožáru. Z obrázku lze vyčíst, že tato vzdálenost není v tomto případě porušena.

8 Závěr

V bakalářské práci je zpracována teoretická část návrhu vedení. Nabízí přehled dílčích částí ovlivňující výsledný návrh vedení. V první kapitole je vysvětlen rozdíl mezi distribuční a přenosovou sítí. Přenosová síť funguje jako kostra distribuční soustavy, kterou napájí. Do přenosové soustavy jsou vyvedeny výkony z velkých zdrojů. Naopak distribuční síť zajišťuje dodávku elektrické energie přímo ke spotřebitelům. V další části je uveden přehled různých typů vodičů využívaných v sítích velmi vysokého a zvláště vysokého napětí, které obsahují i speciální typy vodičů. Jsou zde zmíněny také požadavky na tyto vodiče, rozličné tvary a materiály. Další část je věnována stožárům, které zajišťují bezpečnost vedení. Udržují vodiče v bezpečné vzdálenosti od okolí, tak aby neohrozili člověka nebo jiné objekty. Mají také funkci nosnou a výztužnou.

Velkou část teoretického oddílu práce tvoří vliv klimatických vlivů na vlastnosti vedení. Jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet zatížení vodiče vlivem větru, námrazy tak i kombinace těchto jevů. Kombinace těchto podmínek může způsobit až několikanásobné zvětšení zatížení vodiče oproti ideálnímu stavu. Proto je odolnost vůči námraze a větru jedna z nejdůležitějších věcí při návrhu vedení. Poslední část teorie se zabývá mechanikou samotného vodiče. V této kapitole je provedeno odvození průhybové křivky, a to jak paraboly, tak také řetězovky. Je zde zmíněn také případ nesouměrně zavěšeného vodiče. To je situace, kdy nejsou oba závěsné body ve stejné nadmořské výšce. V neposlední řadě také tato kapitola obsahuje stavovou rovnici napnutého vodiče. Stavová rovnice vyjadřuje vliv změny teploty a atmosférických vlivů na mechanické napětí ve vodiči. Mechanický výpočet realizujeme pro nejnepříznivější případ, který může nastat. To znamená pro takové podmínky, kdy nastává největší průhyb, tedy nejmenší vzdálenost od země resp. od okolních objektů.

V praktické části této práce je popsán průběh návrhu úseku vedení přenosové soustavy pro vyvedení výkonu z přečerpávací vodní elektrárny (400 MW). Nejdříve je zmapována uvažovaná lokalita (okolí Ústí nad Labem) z hlediska topologie sítí a vyhledány informace o zvažovaném budoucím rozvoji sítí a nových zdrojů. Po zmapování oblasti byly navrženy různé varianty vyvedení výkonu uvažovaného zdroje. Při detailním rozboru možných variant byly vyloučeny varianty, které byly na napěťových úrovních 110 kV a 220 kV. 110 kV byla vyloučena zejména pro nepříznivé zkratové poměry v síti a 220 kV kvůli uvažovanému rušení této napěťové hladiny v České republice. Jako výsledné řešení bylo vybráno rozdělení výkonu do dvou směrů respektive dvou rozvodů. Konkrétně jsou to rozvodny Chotějovice a Babylon. U této varianty se počítá s náhradou trasy rušené linky V210 (Chotějovice - Bezděčín) a vybudování krátké odbočky (cca 2 km) do rozvodny Babylon. Na trase uvažované varianty vedení byly vypracovány návrhy dvou kotevních úseků vedení v různých námrazových oblastech. Na těchto úsecích bylo ukázáno, jak se liší parametry vedení v různých námrazových oblastech. V oblastech s vyšším výskytem námrazy se obecně zkracuje délka stožárů, protože se zmenšuje tah ve vodiči, aby nedošlo k mechanickému

poškození vodiče. Jako součást práce byly vytvořeny také projekční tabulky a podélné profily obou úseků vedení. Projekční tabulka nabízí výpis hodnot parametrů vedení pro různé stavy a všechna rozpětí. Podélný profil naopak nabízí pohled na maximální průhyb vedení v daných úsecích, který nastává při teplotě vodiče 80 °C. Je v něm také zakreslen půdorys uvažované trasy a od něj se odvíjející rozmístění stožárů. Poslední část návrhu úseku vedení se zabývá nebezpečným vychýlením izolátoru. Toto vychýlení je způsobeno větrem a může mít za následek narušení bezpečné vzdálenosti vodiče od podpěrného bodu, tedy ohrožení bezpečnosti chodu vedení.

9 Použitá literatura

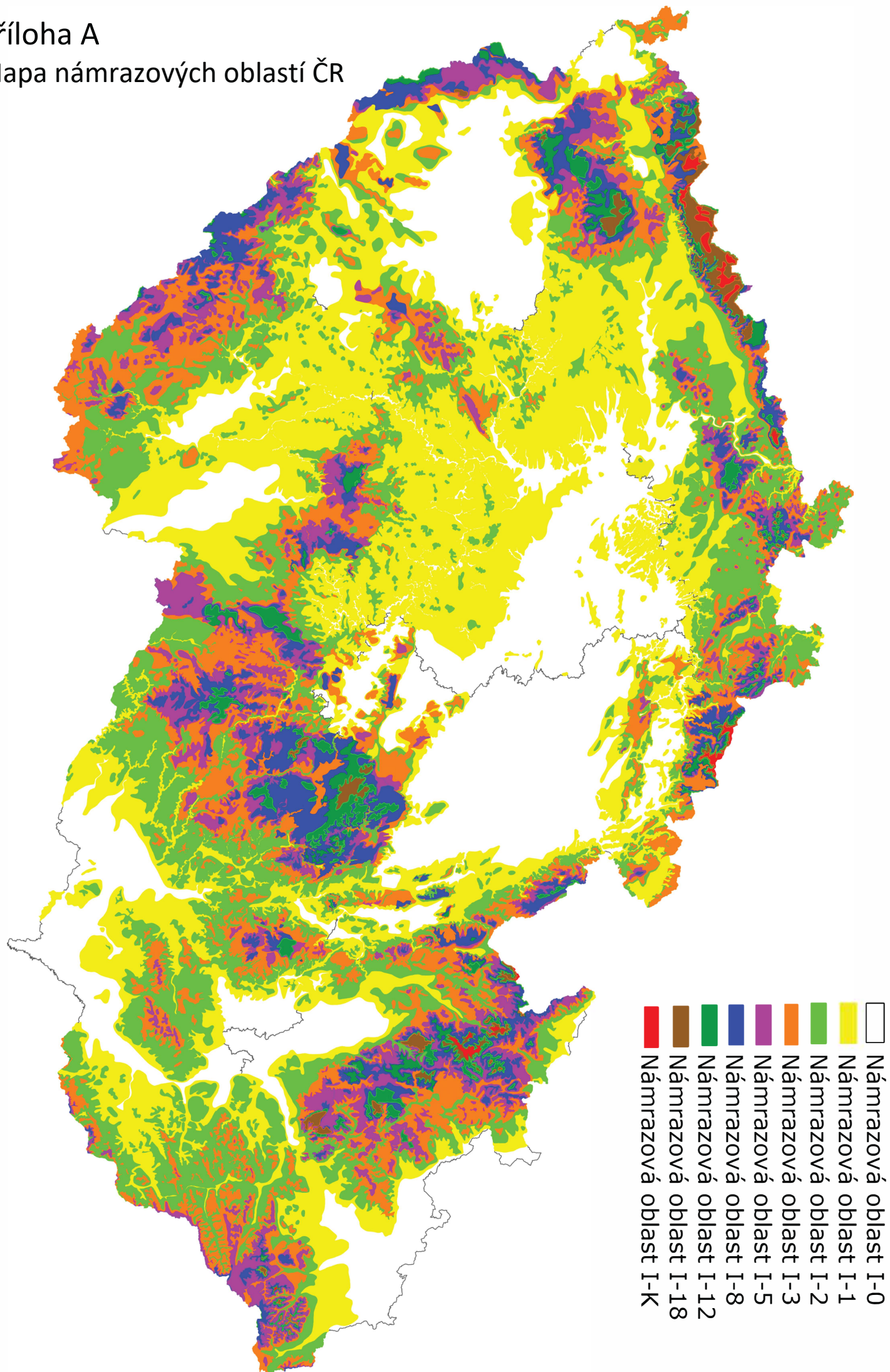
- [1] Přenosová soustava elektrické energie. *TZB-info* [online]. Prah: Topinfo, 2016 [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/eлектроenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [2] Jaký je rozdíl mezi distributorem a dodavatelem elektřiny? *Elektřina.cz* [online]. Praha: Ušetřeno.cz, 2017 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.elektrina.cz/distribuce-elektriny>
- [3] Vznik a vývoj přenosové soustavy elektrické energie - TZB-info. TZB-info stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2016 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/eлектроenergetika/13645-vznik-a-vyvoj-prenosove-soustavy-elektricke-energie>
- [4] Schéma sítí. *Čeps* [online]. 2017 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-pravy/Documents/Schema_siti_2015.jpg
- [5] ČEPS, a.s. - Údaje o PS. *ČEPS, a.s.* [online]. Praha: ČEPS, a.s., 2016 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Udaje-o-PS.aspx>
- [6] Uhelné elektrárny v ČR. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2016 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr.html>
- [7] PTÁČEK, Jiří, Petr MODLITBA a Jiří MALÝ. Potenciál výstavby VTE v ČR a možnosti elektrických sítí pro jejich připojení [online]. Konference ČK Cired 2009. Tábor: ČK Cired, 2009 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/Produkty/Orsag/s4_02.pdf
- [8] ČEPS, a. s., Technická infrastruktura, Rozvoj PS, Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2016 - 2025, [online], 2015, [2016-11-19], Dostupné z: <http://www.ceps.cz>
- [9] OTE : Zpráva o očekávané dlouhodobé rovnováze mezi nabídkou a poptávkou elektřiny a plynu 2015. Praha: OTE, 2015. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/o-spolecnosti/soubory-vyrocní-zprava-ote/zoor-2015.pdf/view>
- [10] Elektrické sítě - OTE, a.s. *OTE, a.s.* [online]. Praha: OTE, a.s., 2010 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/statistika/dlouhodobá-rovnováha/elektricke-site>
- [11] Mapy ke stažení. *OTE, a.s.* [online]. Praha: OTE, 2010 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/statistika/dlouhodobá-rovnováha-elektrina/mapy-ke-stazeni/>
- [12] Stručné netechnické shrnutí údajů uvedených v žádosti, Dokument na vyžádání Ministerstva životního prostředí [online], [2016-11-19], Dostupné na: <http://www.mzp.cz>

- [13] Střekov, Obnovitelné zdroje. *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2015 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny-cez/strekov.html>
- [14] Roční zpráva o provozu ES ČR 2008. *ERÚ* [online]. Jihlava: ERÚ, 2008 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/legacyerustaticdata/RZ2008/rz/index.htm>
- [15] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno. Skripta. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [16] PATERA, Michal. *Vliv nových trendů na návrh venkovních vedení*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Luděk Krba.
- [17] LIST, Vladimír a Karel POCHOP. *Mechanika venkovních vedení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
- [18] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049402.
- [19] ŠMÍD, Jakub. *Vliv volby typu vodiče na modernizaci vedení VVN*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jakub Smejkal.
- [20] Tvary a klasické typy vodičů vedení VVN. *OEnergetice* [online]. [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/tvary-a-klasicke-typy-vodicu-vedeni-vvn/>
- [21] Vysokoteplotní vodiče vedení VVN. *OEnergetice* [online]. [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/vysokoteplotni-vodice-vedeni-vvn/>
- [22] OTČENÁŠOVÁ, Alena. *Mechanika vonkajších silových vedení*. Žilina: EDIS, 2010. ISBN 978-80-554-0181-2.
- [23] Stožáry VVN (I). *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, 2016 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i>
- [24] Stožáry VVN (II). *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, 2016 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4183-stozary-vvn-ii>
- [25] Stožáry v energetice. *Technika a trh* [online]. Brno: Webservis, 2013 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/elektrotechnika/stozary-v-energetice>
- [26] Stožáry VVN (III). *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, 2016 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4192-stozary-vvn-iii>
- [27] Elektrické stožáry aneb poznáš kočku na poli? *OEnergetice* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/elektricke-stozary-aneb-poznas-kocku-na-poli/>
- [28] Navrhování a stavba venkovních vedení nad AC 45 kV: PNE 33 3300. 2016.

- [29] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Elektrické stanice a vedení*. Brno, 2013. Skripta. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [30] Kodex přenosové soustavy: Část II. - Podpůrné služby. Revize 16. Praha: ČEPS, 2016.
- [31] Podpůrné služby - přenos elektřiny. OEnergetice [online]. [cit. 2017-03-14]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/podpurne-sluzby-prenos-elekriny/>
- [32] Lanové vodiče pro elektrická vedení přenosové soustavy: TN/46/2014. 3. Praha: ČEPS, 2014.

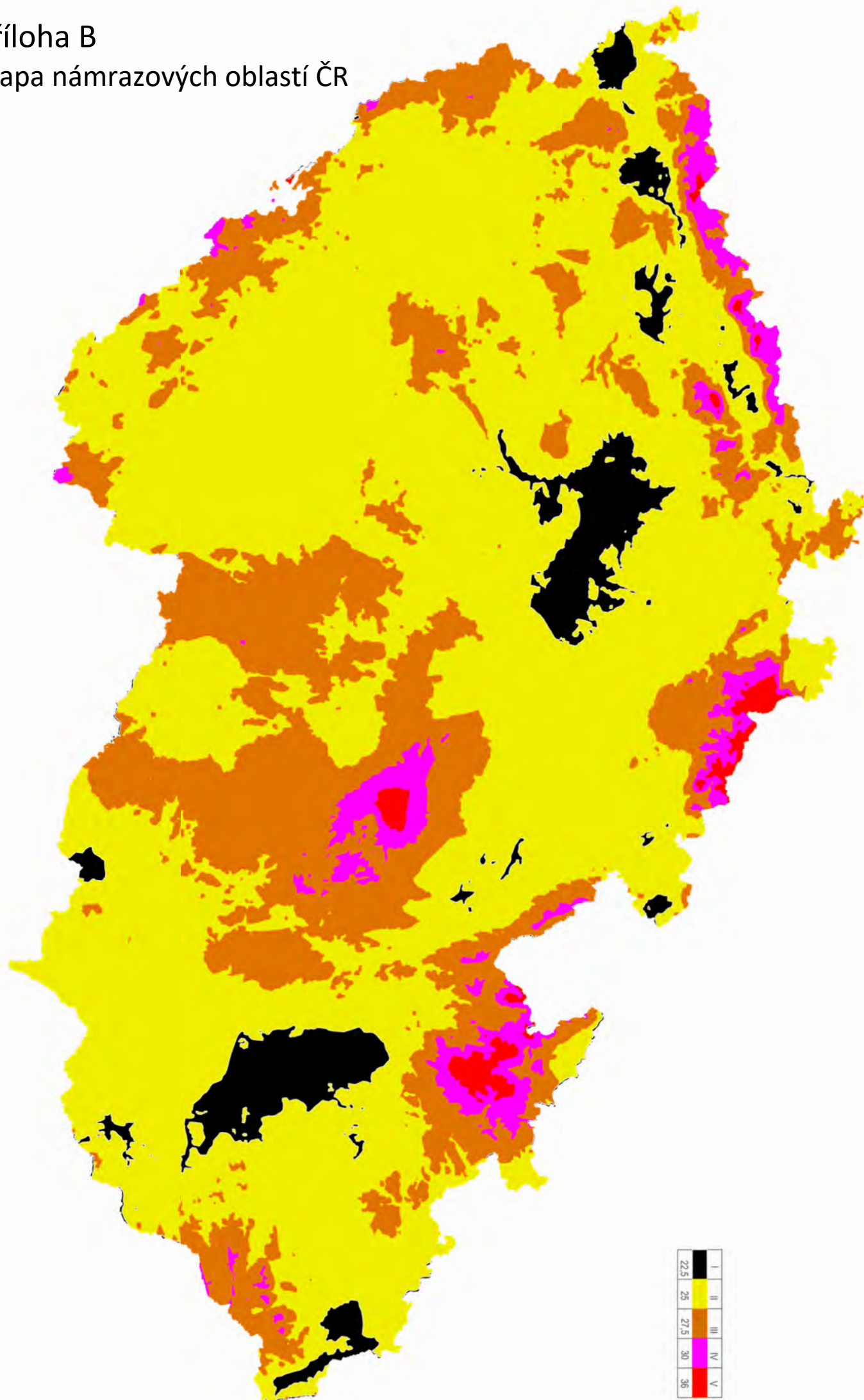
Příloha A

Mapa námrazových oblastí ČR

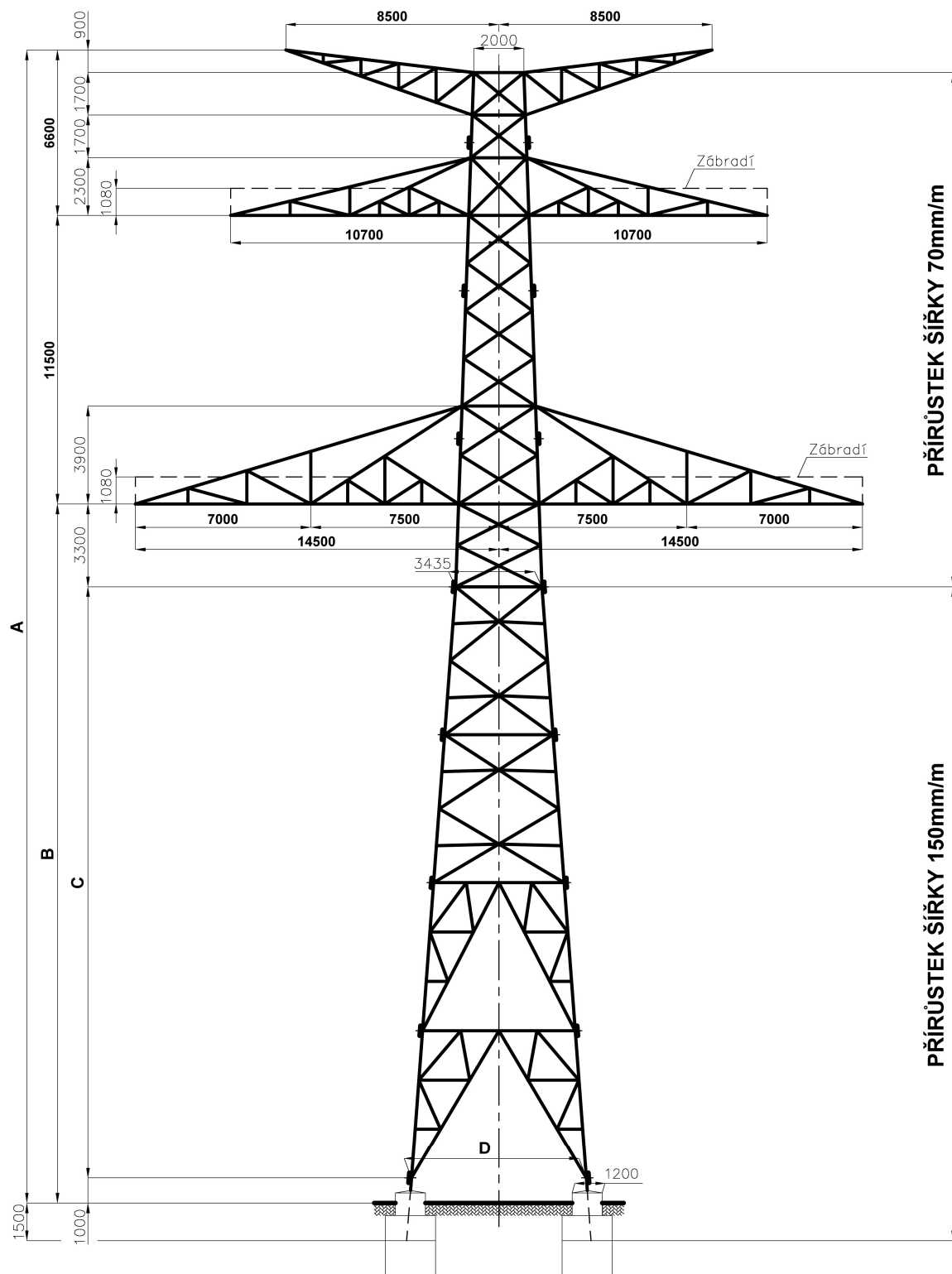


Příloha B

Mapa námrazových oblastí ČR



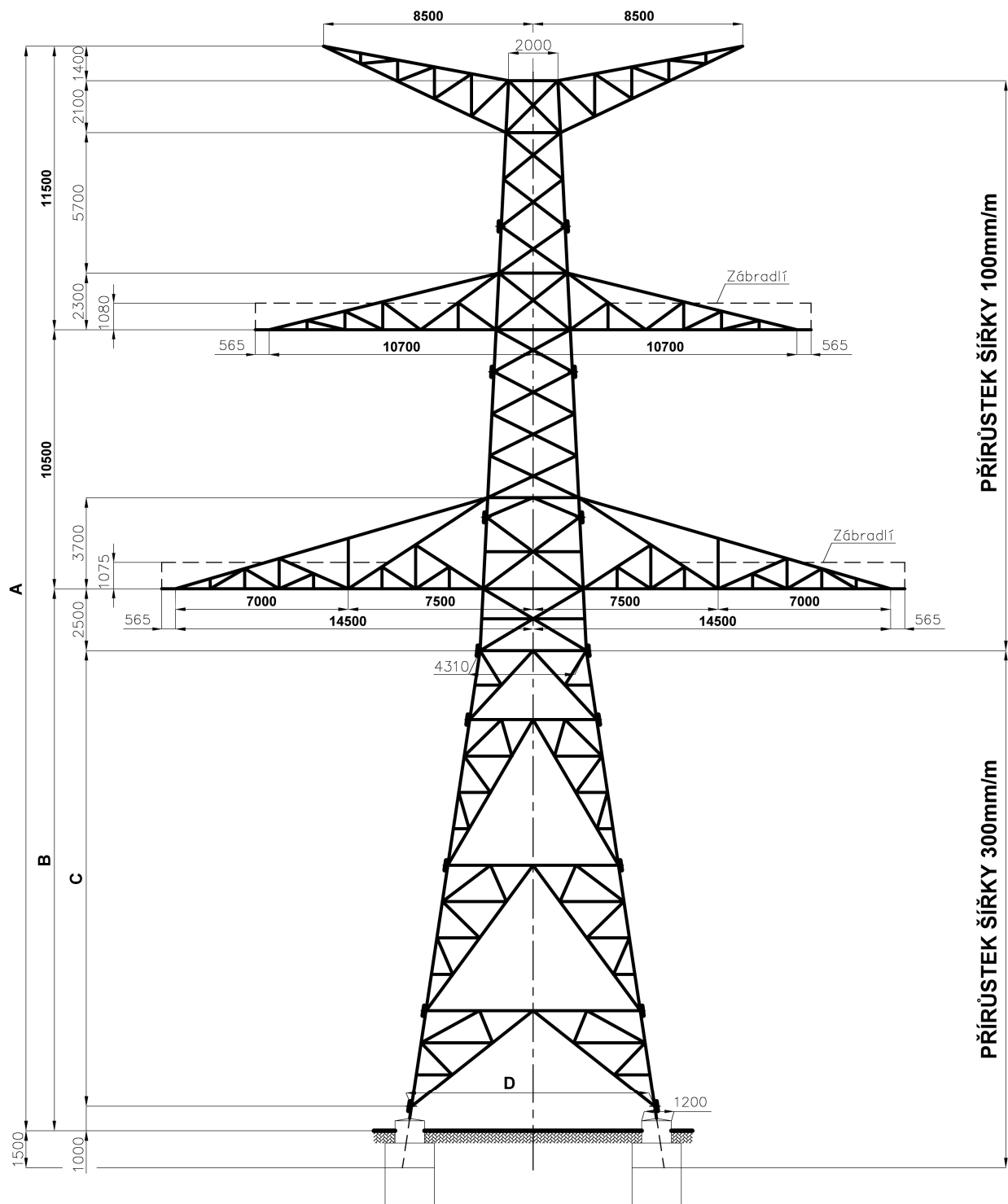
Stožár nosný - DUNAJ



ROZMĚR	PŘEVÝŠENÍ STOŽÁRU						
	+0	+2	+4	+6	+8	+10	+12
A	46000	48000	49900	51900	53900	55800	57800
B	27900	29900	31800	33800	35800	37700	39700
C	23600	25600	27500	29500	31500	33400	35400
D	6975	7275	7560	7860	8160	8445	8745

Příloha D

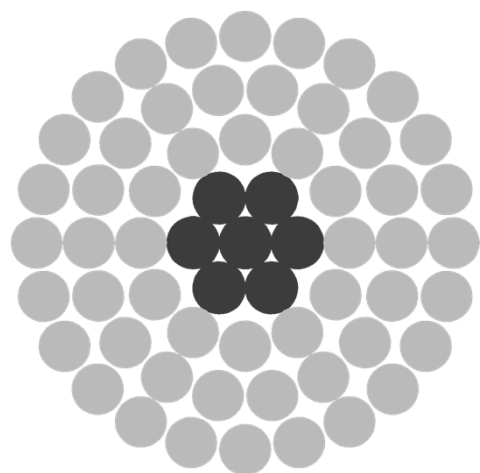
Stožár kotevní - DUNAJ RV170



ROZMĚR	PŘEVÝŠENÍ STOŽÁRU						
	+0	+2	+4	+6	+8	+10	+12
A	44000	46000	48000	49900	51900	53900	55800
B	22000	24000	26000	27900	29900	31900	33800
C	18500	20500	22500	24400	26400	28400	30300
D	9860	10460	11060	11630	12230	12830	13400

Příloha E

Lano 490-AL1/64-ST1A



M 2:1

Označení vodiče (Conductor designation)	490-AL1/64-ST1A		
Fe duše lana (Steel core)	Materiál drátů (material of wire)	(-)	ST1A
	Počet drátů / konstrukce (number of wires)	(-)	1+6
	Jmenovitý průměr drátů (wire diameter)	(mm)	3,4
	Vypočtená hmotnost duše (steel core mass)	(kg.km ⁻¹)	497,02
	Celkový průřez duše (steel core sectional area)	(mm ²)	63,55
Al plášť lana (Envelope [Al layers])	Materiál drátů (material of wire)	(-)	AL1
	Počet drátů / konstrukce (number of wires)	(-)	12+18+24
	Jmenovitý průměr drátů (wire diameter)	(mm)	3,4
	Vypočtená hmotnost pláště (envelope mass)	(kg.km ⁻¹)	1355,83
	Celkový průřez pláště (envelope cross sectional area)	(mm ²)	490,28
Mazivo (Grease)	Mazaná pouze ocelová duše vodiče (podle EN 50182, příloha B, případ 1) (grease application according to EN 50182, case 1, steel core only greased)		
	Hmotnost maziva (nominal mass of grease)	(kg.km ⁻¹)	12,60
Lano (Cable total)	Jmenovitý průměr lana (overall diameter)	(mm)	30,60
	Celkový průřez lana (total cross sectional area)	(mm ²)	553,83
	Hmotnost lana bez maziva (conductor mass without grease)	(kg.km ⁻¹)	1852,85
	Hmotnost lana s mazivem (conductor mass including grease)	(kg.km ⁻¹)	1865,45
	Modul pružnosti (modul of elasticity)	(MPa)	67 100
	Součinitel teplotní délkové roztažnosti (coef. of linear exp.)	10 ⁶ (K ⁻¹)	19,44
	Jmenovitá pevnost v tahu (conductor rated tensile strength)	(kN)	150,81
	Elektrický stejnosměrný odpor při +20 °C bez ocelové duše (nominal resistance R _{DC} at +20 °C without steel core)	(Ω.km ⁻¹)	0,05898
	Směr vinutí vnější vrstvy (direction of outer lay)	(-)	pravotočivý (clockwise)

Příloha F

Projekční tabulka - 1. úsek

Projekční tabulka

výpočet konečného stavu vodičů po 30 letech provozu

Kotevní úsek mezi stožáry č. 1.1 - 1.12

Úroveň spolehlivosti 1 (doba návratu klimatických zatížení 50 let)

$\gamma_w = 1$ $\psi_w = 0,29$ $\gamma_l = 1$ $\psi_l = 0,35$ $\gamma_G = 1$

Lano 490-AL1/64-ST1A

průměr d (mm)	průřez S (mm ²)	hmotnost m (kg·m ⁻¹)	měrná tíha γ (N·cm ⁻³)	modul pruž. E (MPa)	teplotní sou. α (K ⁻¹)	měrný odpor R _{DC20} (Ω·km ⁻¹)	RTS t _{RTS} (kN)	55 % RTS t _{RTS55%} (kN)	námrazek q (N·m ⁻¹)
30,60	553,83	1,8654504	0,0330	67 100	1,9443E-05	0,05898	150,81	82,95	22,6800

Námrazová oblastČSN EN 50341-2-19 I2I_{RS0} = 17,53 + 0,07·d = 19,672 N·m⁻¹I₅₀ = 22,68 N·m⁻¹K_{lc} = 1K_h = 1,153ρ_l = 500 kg·m⁻³

Větrová oblastČSN EN 1991-1-4 - IIIvýška vodičů nad zemí 29,88 m nadmořská výška 311,88 m

Charakteristika terénu:II - Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek jejich výšky
v_{b,0} = 27,50 m·s⁻¹V_h(h)= 33,23 m·s⁻¹q_p(h)= 1445,56 Paq_{wc}= 24,20 N·m⁻¹

referenční taht = 32,00 kNreferenční mechanické napětíσ = 57,78 MPa

teplotaT = -5 °Cpřetíženíz = 1,000

Výpočet pro hodnotu středního rozpětíL_R= 370,3 m

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
I	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	22,68	0	22,68	7,94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tl. n.	(mm)	0	0	0	0	26,01	0	26,01	12,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v _h	(ms ⁻¹)	0	0	0	0	0	33,23	17,89	23,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q _w	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	0	24,2	20,84	23,81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
τ	(°)	0	0	0	0	0	52°55'	26°58'	42°14'	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z	(-)	1	1	1	1	2,24	1,658	2,513	1,937	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
σ	(MPa)	64,78	61,75	59,03	57,78	109,02	86,43	119,00	97,50	56,59	54,38	52,37	50,55	48,88	47,34	45,93	44,63	43,42	46,62
t	(kN)	35,88	34,20	32,69	32,00	60,38	47,87	65,91	54,00	31,34	30,12	29,01	27,99	27,07	26,22	25,44	24,72	24,05	25,82
c	(m)	1961	1869	1787	1749	1474	1578	1434	1524	1713	1646	1586	1530	1480	1433	1391	1351	1315	1412

Průhyby pro jednotlivá rozpětí f (m)

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
322,9		6,65	6,98	7,30	7,46	8,85	8,27	9,10	8,56	7,61	7,92	8,23	8,52	8,82	9,10	9,38	9,66	9,93	9,24
360,36		8,28	8,69	9,09	9,29	11,03	10,30	11,34	10,66	9,48	9,87	10,25	10,62	10,98	11,34	11,69	12,03	12,37	11,52
399,05		10,16	10,66	11,15	11,39	13,53	12,63	13,91	13,08	11,63	12,11	12,57	13,03	13,47	13,91	14,34	14,76	15,17	14,13
372,5		8,85	9,29	9,71	9,92	11,79	11,00	12,11	11,39	10,13	10,55	10,95	11,35	11,74	12,12	12,49	12,86	13,22	12,31
413		10,88	11,42	11,94	12,20	14,49	13,53	14,90	14,01	12,46	12,97	13,47	13,95	14,43	14,90	15,36	15,81	16,25	15,13
324,4		6,71	7,04	7,37	7,53	8,94	8,34	9,19	8,64	7,68	8,00	8,30	8,60	8,90	9,19	9,47	9,75	10,02	9,33
389,7		9,69	10,16	10,63	10,86	12,90	12,04	13,26	12,47	11,09	11,54	11,99	12,42	12,85	13,26	13,67	14,07	14,47	13,47
395,9		10,00	10,49	10,97	11,21	13,32	12,43	13,69	12,87	11,45	11,92	12,37	12,82	13,26	13,69	14,11	14,53	14,93	13,90
384,9		9,45	9,91	10,37	10,60	12,58	11,75	12,94	12,17	10,82	11,26	11,69	12,12	12,53	12,94	13,34	13,73	14,11	13,14
302,9		5,85	6,14	6,42	6,56	7,79	7,27	8,01	7,53	6,70	6,97	7,24	7,50	7,76	8,01	8,26	8,50	8,73	8,13
363,9		8,45	8,86	9,27	9,47	11,25	10,50	11,56	10,87	9,67	10,07	10,45	10,83	11,20	11,56	11,92	12,27	12,61	11,74

Příloha G

Projekční tabulka - 2. úsek

Projekční tabulka

výpočet konečného stavu vodičů po 30 letech provozu

Kotevní úsek mezi stožáry č. 2.1 - 2.11

Úroveň spolehlivosti 1 (dobu návratu klimatických zatížení 50 let)

$\gamma_w = 1$ $\psi_w = 0,29$ $\gamma_l = 1$ $\psi_l = 0,35$ $\gamma_G = 1$

Lano 490-AL1/64-ST1A

průměr d (mm)	průřez S (mm ²)	hmotnost m (kg·m ⁻¹)	měrná tíha γ (N·cm ⁻³)	modul pruž. E (MPa)	teplotní sou. α (K ⁻¹)	měrný odpor R _{DC20} (Ω·km ⁻¹)	RTS t _{RTS} (kN)	55 % RTS t _{RTS55%} (kN)	námrazek q (N·m ⁻¹)
30,60	553,83	1,8654504	0,0330	67 100	1,9443E-05	0,05898	150,81	82,95	90,3529

Námrazová oblast

ČSN EN 50341-2-19 I8

$I_{R50} = 73,89 + 0,153 \cdot d = 78,5718$

$N \cdot m^{-1}$

$I_{50} = 90,3529$

$N \cdot m^{-1}$

Větrová oblast

ČSN EN 1991-1-4 - III

$K_{ic} = 1$

$K_h = 1,15$

$\rho_l = 500$

$kg \cdot m^{-3}$

Charakteristika terénu:

II - Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek jejich výšky

$v_{b,0} = 27,50 \text{ m} \cdot s^{-1}$

$V_h(h) = 33,12 \text{ m} \cdot s^{-1}$

$q_p(h) = 1438,94 \text{ Pa}$

$q_{wc} = 24,37 \text{ N} \cdot m^{-1}$

referenční tah

t = 13,00 kN

referenční mechanické napětí

$\sigma = 23,47 \text{ MPa}$

teplota

T = -5 °C

přetížení

z = 1,000

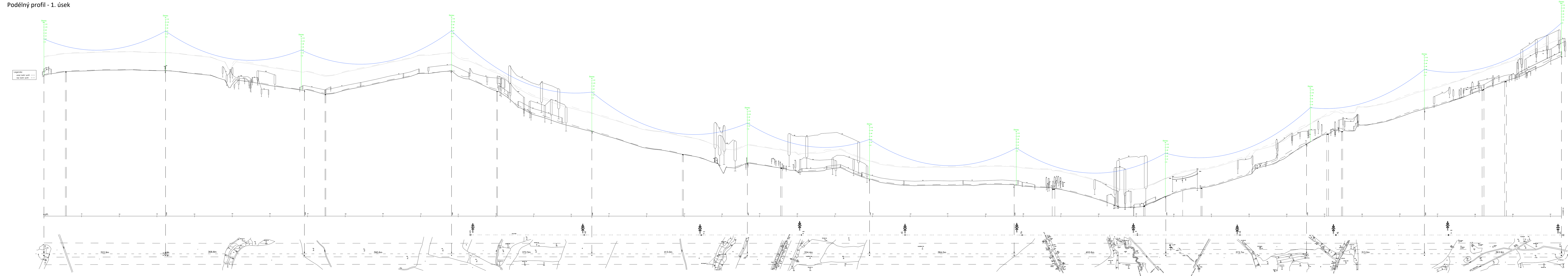
Výpočet pro hodnotu středního rozpětí $L_R = 248,7 \text{ m}$

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
I	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	90,35	0	90,35	31,62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tl. n.	(mm)	0	0	0	0	62,80	0	62,80	32,52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
v _h	(ms ⁻¹)	0	0	0	0	0	33,12	17,84	23,42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q _w	(Nm ⁻¹)	0	0	0	0	0	24,37	39,68	41,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
τ	(°)	0	0	0	0	0	53°6'	20°4'	40°0'	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z	(-)	1	1	1	1	5,939	1,666	6,323	3,562	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
σ	(MPa)	24,63	24,15	23,69	23,47	122,75	38,28	129,67	77,69	23,26	22,85	22,46	22,09	21,73	21,40	21,07	20,77	20,47	21,23
t	(kN)	13,64	13,37	13,12	13,00	67,98	21,20	71,81	43,03	12,88	12,65	12,44	12,23	12,04	11,85	11,67	11,50	11,34	11,76
c	(m)	746	731	717	711	626	696	621	660	704	692	680	669	658	648	638	629	620	643

Průhyby pro jednotlivá rozpětí f (m)

T	(°C)	-30	-20	-10	-5	-5	-5	-5	-5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	55
243,4		9,95	10,15	10,35	10,45	11,87	10,67	11,97	11,25	10,54	10,73	10,92	11,10	11,29	11,47	11,64	11,82	11,99	11,55
288		13,95	14,23	14,50	14,64	16,64	14,96	16,77	15,76	14,78	15,04	15,31	15,56	15,82	16,07	16,32	16,56	16,81	16,20
246,6		10,22	10,42	10,62	10,72	12,19	10,95	12,28	11,55	10,82	11,02	11,21	11,40	11,59	11,77	11,95	12,13	12,31	11,86
231,9		9,03	9,21	9,39	9,48	10,77	9,68	10,86	10,21	9,57	9,74	9,91	10,08	10,24	10,40	10,57	10,72	10,88	10,49
248,1		10,34	10,55	10,75	10,85	12,34	11,09	12,43	11,69	10,95	11,15	11,35	11,54	11,73	11,91	12,10	12,28	12,46	12,01
191,2		6,14	6,26	6,38	6,44	7,32	6,58	7,37	6,93	6,50	6,62	6,73	6,85	6,96	7,07	7,18	7,28	7,39	7,12
203,1		6,93	7,06	7,20	7,27	8,26	7,42	8,32	7,82	7,34	7,47	7,60	7,73	7,85	7,98	8,10	8,22	8,34	8,04
224,9		8,49	8,67	8,83	8,92	10,13	9,11	10,21	9,60	9,00	9,16	9,32	9,48	9,63	9,78	9,94	10,08	10,23	9,86
245,7		10,14	10,35	10,55	10,65	12,10	10,87	12,19	11,46	10,74	10,94	11,13	11,32	11,50	11,68	11,86	12,04	12,22	11,77
309		16,06	16,39	16,70	16,86	19,17	17,23	19,32	18,16	17,02	17,33	17,63	17,93	18,22	18,51	18,80	19,08	19,36	18,66

Podélný profil - 1. úsek



Příloha I

Podélný profil - 2. úsek

